

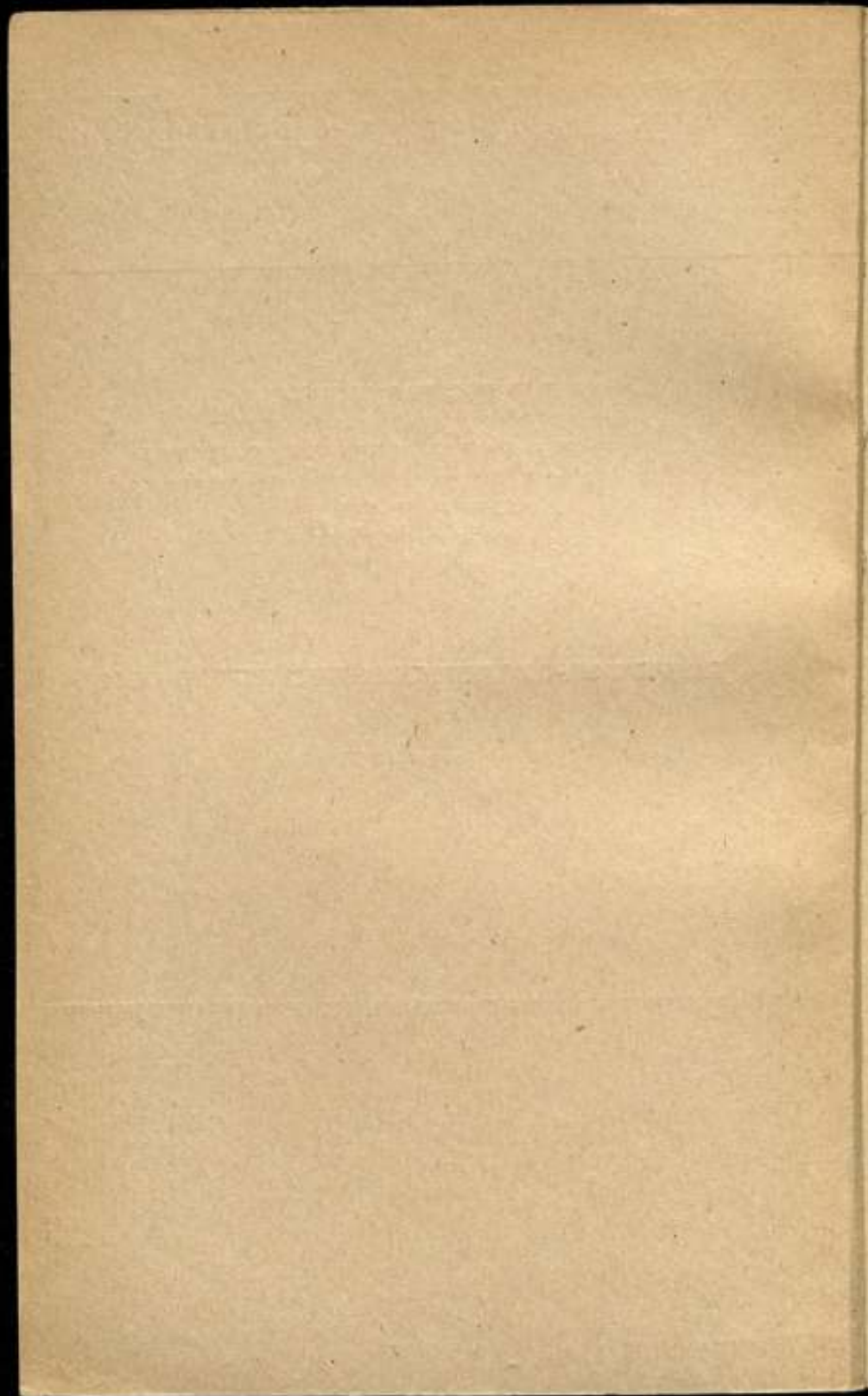
**ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ИНСТИТУТ МЕТРОЛОГИИ  
ИМ. Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА**

**ИССЛЕДОВАНИЯ  
В ОБЛАСТИ ИЗМЕРЕНИЙ  
МАССЫ**

**ТРУДЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ИНСТИТУТОВ СССР**

Выпуск 132(192)





ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
МЕТРОЛОГИИ ИМ. Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

# ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ИЗМЕРЕНИЙ М А С С Ы

ТРУДЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ИНСТИТУТОВ СССР

Выпуск 132 (192)

*Под редакцией  
канд. техн. наук Н. А. СМОРНОВОЙ*

ж 15555<sup>а</sup>



«ЭНЕРГИЯ»  
Ленинградское отделение  
1972

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

В. О. Арутюнов (председатель), Н. Н. Александрова (секретарь), С. В. Горбачевич, А. Н. Гордов, Е. Ф. Долинский, А. И. Карташев, Л. К. Каяк, И. И. Кириков, Д. К. Коллеров, Е. Д. Колтик, П. П. Кремлевский, И. Н. Кротков, В. Л. Лассан, Б. Н. Олейник, Л. К. Пеккер, Т. Б. Рождественская, А. М. Федоров, Е. Н. Чечурина, К. П. Широков, Е. Г. Шрамков, М. Ф. Юдин

В настоящем сборнике публикуются работы по исследованию и усовершенствованию эталонных и образцовых средств измерения массы. В этой группе статей излагаются методика и результаты сличений эталонов-копий с Государственным эталоном единицы массы СССР, проведенных в 1968—1969 гг., работы по созданию наборов эталонных гирь от 1 до 10 кг и образцовых весов 1-го разряда повышенной точности от 2 г до 20 кг. Статья Н. А. Смирновой и С. И. Торопина посвящена исследованию и аттестации группы исходных образцовых пурок 1-го разряда повышенной точности.

Некоторые вопросы теории весов, в основном весов новой конструкции с автоматическим уравновешиванием, рассмотрены в работах В. Г. Фефкитова и В. Я. Кузьмина. В них производится анализ динамических свойств весов с автоматическим уравновешиванием и погрешностей аналитических весов с фотоэлектрическим кодовым преобразователем; рассматривается также влияние внутренних «гармонических» помех на весы с автоматическим уравновешиванием.

В статье Н. А. Смирновой, М. Н. Мошковой, А. Т. Руденко дано описание установки для определения магнитных моментов гирь, которая несомненно поможет при исследовании точных гирь из нержавеющей стали. В статьях авторов Е. И. Перельмана, С. М. Агеева анализируются причины, влияющие на точность взвешивания на вагонных весах, в том числе на весах, предназначенных для взвешивания вагонов на ходу; предлагается новая методика проверки буккерных весов с предельной нагрузкой 70 000 кг.

В сборник вошли также три обзорные статьи (М. И. Тютиковой; Н. А. Смирновой, М. Н. Мошковой и А. П. Нечелова), посвященные новым стандартам на лабораторные весы и гири, работам Международного бюро мер и весов по единичным национальным прототипам килограмма и новым разработкам завода «Госметр».

Ответственный редактор  
доктор технических наук профессор  
В. О. АРУТЮНОВ

Н. А. СМЕРНОВА, М. И. МОШКОВА, В. С. СНЕГОВ, М. И. ТЮТИКОВА  
ВНИИМ

### СЛИЧЕНИЯ ЭТАЛОНОВ-КОПИЙ С ГОСУДАРСТВЕННЫМ ЭТАЛОНОМ КИЛОГРАММА СССР В 1968—1969 гг.

Основой измерений массы в СССР является Государственный эталон килограмма, в состав которого входят:

1) копия международного прототипа килограмма — платиноиридиевый прототип, носящий знак 12, представляющий собой гирию в виде прямого цилиндра с закругленными ребрами диаметром и высотой 39 мм;

2) эталонные весы № 1 (Рупрехт) и № 2 (ВНИИМ) на 1 кг с дистанционным управлением, служащие для передачи размера единицы массы от прототипа № 12 эталонам-копиям и от эталонных-копий рабочим эталонам по методике, установленной спецификацией.

Масса прототипа № 12 устанавливается на основании сличений его в Международном бюро мер и весов с международным прототипом килограмма и его свидетелями. Эти сличения проводятся примерно один раз в пятьдесят лет.

По результатам последних сличений, проведенных в 1948—1954 гг. для прототипа № 12, принято следующее уравнение:

$$\text{масса прототипа № 12} = 1 \text{ кг} + 0,085 \text{ мг.}$$

Сличения эталонных-копий с прототипом № 12 проводятся примерно один раз в десять лет. При сличениях в 1959 г. была применена новая методика [2].

В 1965 г. выполнены контрольные сличения эталонных-копий из нержавеющей стали  $V \frac{\text{ст}}{1 \text{ кг}}$  № 6,  $H \frac{\text{ст}}{1 \text{ кг}}$  № 8 и  $V \frac{\text{ст}}{1 \text{ кг}}$  № 15 с эталонной-копией

из платиноиридиевого сплава  $R_1 \frac{\text{Pt Ir}}{1 \text{ кг}}$ . При этом исходили из того, что так

как эталон  $R_1 \frac{\text{Pt Ir}}{1 \text{ кг}}$  изготовлен из высокостабильного платиноиридиевого

сплава и не применялся для проверки рабочих эталонных, то его масса не изменилась по сравнению с определенной в 1959 г. Контрольные сличения показали, что эталонные-копии находятся в удовлетворительном состоянии и их можно применять для проверки рабочих эталонных в течение трех-четырех лет.

В 1968 г. производились очередные сличения эталонных-копий с прототипом № 12 на весах № 1 (Рупрехт). К этому времени возникла необходимость в расширении группы эталонных-копий. В связи с этим в круговые сличения с прототипом № 12 были включены дополнительно два вновь созданных эталона массы — килограммовые гири из нержавеющей стали, обозначающиеся

$V \frac{\text{ст}}{1 \text{ кг}}$  № 13 и  $V \frac{\text{ст}}{1 \text{ кг}}$  № 16.



Таким образом, в сличения с первичным эталоном вошло шесть гирь: эталоны-копии  $R_1 \frac{\text{Pt Ir}}{1 \text{ кг}}$ ,  $B \frac{\text{ст}}{1 \text{ кг}}$  № 6,  $H \frac{\text{ст}}{1 \text{ кг}}$  № 8,  $B \frac{\text{ст}}{1 \text{ кг}}$  № 15 и новые килограммовые гири  $B \frac{\text{ст}}{1 \text{ кг}}$  № 13 и  $B \frac{\text{ст}}{1 \text{ кг}}$  № 16.

Так как в 1959 г. при разработке новой методики сличений эталонов-копий с прототипом № 12 расчетные формулы выводились для сличений четырех эталонов-копий, то возникла необходимость в выводе новых расчетных формул. При этом методика сличений не изменилась.

#### Расчетные формулы для обработки результатов сличений эталонов-копий с первичным эталоном

При сличениях в качестве исходного эталона служит прототип № 12, поправка  $k_0$  которого известна на основании сличений килограмма № 12 с международным прототипом. Поверялись эталоны-копии  $R_1 \frac{\text{Pt Ir}}{1 \text{ кг}}$ ,  $H \frac{\text{ст}}{1 \text{ кг}}$  № 8,  $B \frac{\text{ст}}{1 \text{ кг}}$  № 6,  $B \frac{\text{ст}}{1 \text{ кг}}$  № 15 и гири  $B \frac{\text{ст}}{1 \text{ кг}}$  № 13 и  $B \frac{\text{ст}}{1 \text{ кг}}$  № 16, поправки которых  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$  необходимо определить на основании поверки.

Производились следующие серии сличений (табл. 1)

На основании сличений можно составить условные уравнения\*:

$$\begin{array}{ll}
 1x_1 + 0x_2 + 0x_3 + 0x_4 + 0x_5 + 0x_6 = k_0 - k_1 & P_1 \quad (1) \\
 0x_1 + 0x_2 + 0x_3 + 1x_4 + 0x_5 + 0x_6 = k_0 - k_2 & P_2 \quad (2) \\
 1x_1 + (-1)x_2 + 0x_3 + 0x_4 + 0x_5 + 0x_6 = k_3 & P_2 \quad (3) \\
 1x_1 + 0x_2 + (-1)x_3 + 0x_4 + 0x_5 + 0x_6 = k_4 & P_2 \quad (4) \\
 1x_1 + 0x_2 + 0x_3 + (-1)x_4 + 0x_5 + 0x_6 = k_5 & P_2 \quad (5) \\
 1x_1 + 0x_2 + 0x_3 + 0x_4 + (-1)x_5 + 0x_6 = k_6 & P_2 \quad (6) \\
 1x_1 + 0x_2 + 0x_3 + 0x_4 + 0x_5 + (-1)x_6 = k_7 & P_2 \quad (7) \\
 0x_1 + 1x_2 + (-1)x_3 + 0x_4 + 0x_5 + 0x_6 = k_8 & P_1 \quad (8) \\
 0x_1 + 1x_2 + 0x_3 + (-1)x_4 + 0x_5 + 0x_6 = k_9 & P_1 \quad (9) \\
 0x_1 + 1x_2 + 0x_3 + 0x_4 + (-1)x_5 + 0x_6 = k_{10} & P_1 \quad (10) \\
 0x_1 + 1x_2 + 0x_3 + 0x_4 + 0x_5 + (-1)x_6 = k_{11} & P_1 \quad (11) \\
 0x_1 + 0x_2 + 1x_3 + (-1)x_4 + 0x_5 + 0x_6 = k_{12} & P_1 \quad (12) \\
 0x_1 + 0x_2 + 1x_3 + 0x_4 + (-1)x_5 + 0x_6 = k_{13} & P_1 \quad (13) \\
 0x_1 + 0x_2 + 1x_3 + 0x_4 + 0x_5 + (-1)x_6 = k_{14} & P_1 \quad (14) \\
 0x_1 + 0x_2 + 0x_3 + 1x_4 + (-1)x_5 + 0x_6 = k_{15} & P_1 \quad (15) \\
 0x_1 + 0x_2 + 0x_3 + 1x_4 + 0x_5 + (-1)x_6 = k_{16} & P_1 \quad (16) \\
 0x_1 + 0x_2 + 0x_3 + 0x_4 + 1x_5 + (-1)x_6 = k_{17} & P_1 \quad (17)
 \end{array}$$

\* Через  $P_i$  обозначен вес уравнения.

Таблица 1

| Порядковый номер сличения | Сличаемый эталон                        | Эталон-копия, с которым сличается       | Разность поправок    |
|---------------------------|---|---|----------------------|
| 1                         | № 12                                    | $R_1 \frac{\text{PtIr}}{1 \text{ кг}}$  | $k_0 - x_1 = k_1$    |
| 2                         | № 12                                    | $B \frac{\text{ст}}{1 \text{ кг}}$ № 15 | $k_0 - x_4 = k_2$    |
| 3                         | $R_1 \frac{\text{PtIr}}{1 \text{ кг}}$  | $H \frac{\text{ст}}{1 \text{ кг}}$ № 8  | $x_1 - x_2 = k_3$    |
| 4                         | $R_1 \frac{\text{PtIr}}{1 \text{ кг}}$  | $B \frac{\text{ст}}{1 \text{ кг}}$ № 6  | $x_1 - x_3 = k_4$    |
| 5                         | $R_1 \frac{\text{PtIr}}{1 \text{ кг}}$  | $B \frac{\text{ст}}{1 \text{ кг}}$ № 15 | $x_1 - x_4 = k_5$    |
| 6                         | $R_1 \frac{\text{PtIr}}{1 \text{ кг}}$  | $B \frac{\text{ст}}{1 \text{ кг}}$ № 13 | $x_1 - x_5 = k_6$    |
| 7                         | $R_1 \frac{\text{PtIr}}{1 \text{ кг}}$  | $B \frac{\text{ст}}{1 \text{ кг}}$ № 16 | $x_1 - x_6 = k_7$    |
| 8                         | $H \frac{\text{ст}}{1 \text{ кг}}$ № 8  | $B \frac{\text{ст}}{1 \text{ кг}}$ № 6  | $x_2 - x_3 = k_8$    |
| 9                         | $H \frac{\text{ст}}{1 \text{ кг}}$ № 8  | $B \frac{\text{ст}}{1 \text{ кг}}$ № 15 | $x_2 - x_4 = k_9$    |
| 10                        | $H \frac{\text{ст}}{1 \text{ кг}}$ № 8  | $B \frac{\text{ст}}{1 \text{ кг}}$ № 13 | $x_2 - x_5 = k_{10}$ |
| 11                        | $H \frac{\text{ст}}{1 \text{ кг}}$ № 8  | $B \frac{\text{ст}}{1 \text{ кг}}$ № 16 | $x_2 - x_6 = k_{11}$ |
| 12                        | $B \frac{\text{ст}}{1 \text{ кг}}$ № 6  | $B \frac{\text{ст}}{1 \text{ кг}}$ № 15 | $x_3 - x_4 = k_{12}$ |
| 13                        | $B \frac{\text{ст}}{1 \text{ кг}}$ № 6  | $B \frac{\text{ст}}{1 \text{ кг}}$ № 13 | $x_3 - x_5 = k_{13}$ |
| 14                        | $B \frac{\text{ст}}{1 \text{ кг}}$ № 6  | $B \frac{\text{ст}}{1 \text{ кг}}$ № 16 | $x_3 - x_6 = k_{14}$ |
| 15                        | $B \frac{\text{ст}}{1 \text{ кг}}$ № 15 | $B \frac{\text{ст}}{1 \text{ кг}}$ № 13 | $x_4 - x_5 = k_{15}$ |
| 16                        | $B \frac{\text{ст}}{1 \text{ кг}}$ № 15 | $B \frac{\text{ст}}{1 \text{ кг}}$ № 16 | $x_4 - x_6 = k_{16}$ |
| 17                        | $B \frac{\text{ст}}{1 \text{ кг}}$ № 13 | $B \frac{\text{ст}}{1 \text{ кг}}$ № 16 | $x_5 - x_6 = k_{17}$ |

Можно принять  $P_2 = 1$  и  $P_1 = 3$  [2]. Система условных уравнений (1)–(17) решается методом наименьших квадратов с помощью матриц.

Матрица коэффициентов нормальных уравнений

$$\|B\| = \|A^*\| \cdot \|P\| \cdot \|A\|; \quad (18)$$

матрица свободных членов нормальных уравнений

$$\|C\| = \|A^*\| \cdot \|P\| \cdot \|C\|. \quad (19)$$

Здесь  $\|A\|$  — матрица коэффициентов условных уравнений;  $\|P\|$  — матрица весов;  $\|C\|$  — матрица правых частей условных уравнений;  $\|A^*\|$  — транспонированная матрица  $\|A\|$ .

Из условных уравнений (1)–(17):

$$\|A\| = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \end{pmatrix} \quad (20)$$

$$\|P\| = \begin{pmatrix} P_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & P_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_1 \end{pmatrix} \quad (21)$$



$$\|C\| = \begin{pmatrix} k_0 - k_1 \\ k_0 - k_2 \\ k_3 \\ k_4 \\ k_5 \\ k_6 \\ k_7 \\ k_8 \\ k_9 \\ k_{10} \\ k_{11} \\ k_{12} \\ k_{13} \\ k_{14} \\ k_{15} \\ k_{16} \\ k_{17} \end{pmatrix} \quad (22)$$

Откуда матрица коэффициентов нормальных уравнений имеет вид:

$$\|B\| = \begin{pmatrix} P_1 + 5P_2 & -P_2 & -P_2 & -P_2 & -P_2 & -P_2 \\ -P_2 & P_2 + 4P_1 & -P_1 & -P_1 & -P_1 & -P_1 \\ -P_2 & -P_1 & P_2 + 4P_1 & -P_1 & -P_1 & -P_1 \\ -P_2 & -P_1 & -P_1 & 2P_2 + 4P_1 & -P_1 & -P_1 \\ -P_2 & -P_1 & -P_1 & -P_1 & P_2 + 4P_1 & -P_1 \\ -P_2 & -P_1 & -P_1 & -P_1 & -P_1 & P_2 + 4P_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 8, & -1, & -1 & -1, & -1, & -1 \\ -1, & 13, & -3 & -3, & -3, & -3 \\ -1, & -3, & 13 & -3, & -3, & -3 \\ -1, & -3, & -3 & 14, & -3, & -3 \\ -1, & -3, & -3 & -3, & 13, & -3 \\ -1, & -3, & -3 & -3, & -3, & 13 \end{pmatrix} \quad (23)$$

Матрица свободных членов нормальных уравнений

$$\|C\| = \begin{pmatrix} (k_0 - k_1) P_1 + P_2 (k_3 + k_4 + k_5 + k_6 + k_7) \\ -k_2 P_2 + P_1 (k_8 + k_9 + k_{10} + k_{11}) \\ -k_4 P_2 + P_1 (-k_8 + k_{12} + k_{13} + k_{14}) \\ (k_0 - k_2) P_2 - k_5 P_2 + P_1 (k_{15} + k_{16} - k_8 - k_{12}) \\ -k_6 P_2 + (-k_{10} - k_{13} + k_{15} + k_{17}) P_1 \\ -k_7 P_2 - (k_{11} + k_{14} + k_{16} + k_{17}) P_1 \end{pmatrix} \quad (24)$$

Решение системы нормальных уравнений (23), (24) имеет вид:

$$\|x\| = \|B\|^{-1} \|C\|, \quad (25)$$

где  $\|B\|^{-1}$  — «обращенная» матрица  $\|B\|$ .

Элементы матрицы  $\|B\|^{-1}$  вычисляем по формуле:

$$b_{ik}^{(-1)} = \frac{B_{ki}}{|B|}, \quad (26)$$

где  $|B|$  — детерминант матрицы  $\|B\|$ ;  $B_{ki}$  — алгебраические дополнения матрицы  $\|B\|$ .

Детерминант матрицы  $\|B\|$  вычисляется по формуле

$$|B| = \sum_{k=1}^4 b_{ik} B_{ik}, \quad (27)$$

где  $b_{ik}$  — элементы матрицы  $\|B\|$ ;  $B_{ik}$  — элементы матрицы алгебраических дополнений.

Алгебраические дополнения

$$B_{ki} = (-1)^{i+k} |B|_{ik}, \quad (28)$$

где  $|B|_{ik}$  — миноры матрицы  $\|B\|$ .

Вычислив по формулам (27) и (28) детерминант матрицы  $\|B\|$  и алгебраические дополнения матрицы  $\|B\|$ , по формуле (26) определяем матрицу:

$$\|B\|^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{20}{76} & \frac{17}{76} & \frac{17}{76} & \frac{16}{76} & \frac{17}{76} & \frac{17}{76} \\ \frac{17}{76} & \frac{501}{16 \cdot 76} & \frac{17 \cdot 25}{16 \cdot 76} & \frac{25}{76} & \frac{17 \cdot 25}{16 \cdot 76} & \frac{17 \cdot 25}{16 \cdot 76} \\ \frac{17}{76} & \frac{17 \cdot 25}{16 \cdot 76} & \frac{501}{16 \cdot 76} & \frac{25}{76} & \frac{17 \cdot 25}{16 \cdot 76} & \frac{17 \cdot 25}{16 \cdot 76} \\ \frac{16}{76} & \frac{25}{76} & \frac{25}{76} & \frac{28}{76} & \frac{25}{76} & \frac{35}{76} \\ \frac{17}{76} & \frac{17 \cdot 25}{16 \cdot 76} & \frac{17 \cdot 25}{16 \cdot 76} & \frac{25}{76} & \frac{501}{16 \cdot 76} & \frac{17 \cdot 25}{16 \cdot 76} \\ \frac{17}{76} & \frac{17 \cdot 25}{16 \cdot 76} & \frac{17 \cdot 25}{16 \cdot 76} & \frac{25}{76} & \frac{17 \cdot 25}{16 \cdot 76} & \frac{501}{16 \cdot 76} \end{pmatrix} \quad (29)$$

Находим искомые значения поправок эталонов-копий:

$$\begin{aligned} x_1 &= \frac{20}{76} [3(k_0 - k_1) + k_3 + k_4 + k_5 + k_6 + k_7] + \\ &+ \frac{17}{76} [3(k_8 + k_9 + k_{10} + k_{11}) - k_2] + \frac{17}{76} [3(k_{12} + k_{13} + k_{14} - k_8) - k_4] + \\ &+ \frac{16}{76} [3(k_{15} + k_{16} - k_9 - k_{12}) + k_0 - k_2 - k_6] + \\ &+ \frac{17}{76} [3(k_{17} - k_{18} - k_{19} - k_{20}) - k_3] + \frac{17}{76} [3(-k_{11} - k_{14} - k_{16} - k_{17}) - k_7]; \\ x_2 &= \frac{17}{76} [3(k_0 - k_1) + k_3 + k_4 + k_5 + k_6 + k_7] + \\ &+ \frac{501}{16 \cdot 76} [3(k_8 + k_9 + k_{10} + k_{11}) - k_2] + \\ &+ \frac{17 \cdot 25}{16 \cdot 76} [3(k_{12} + k_{13} + k_{14} - k_8) - k_4] + \\ &+ \frac{25}{76} [3(k_{15} + k_{16} - k_9 - k_{12}) + k_0 - k_2 - k_6] + \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{17.25}{16.76} [3(k_{17} - k_{10} - k_{13} - k_{15}) - k_6] + \\
 & \qquad \qquad \qquad + \frac{17.25}{16.76} [3(-k_{11} - k_{14} - k_{16} - k_{17}) - k_7]; \quad (31)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 x_3 = & \frac{17}{76} [3(k_0 - k_1) + k_3 + k_4 + k_5 + k_6 + k_7] + \\
 & + \frac{17.25}{16.76} [3(k_8 + k_9 + k_{10} + k_{11}) - k_2] + \frac{501}{16.76} [3(k_{12} + k_{13} + k_{14} - k_8) - k_4] + \\
 & + \frac{25}{76} [3(k_{15} + k_{16} - k_9 - k_{12}) + k_0 - k_2 - k_5] + \\
 & \qquad \qquad \qquad + \frac{17.25}{16.76} [3(-k_{11} - k_{14} - k_{16} - k_{17}) - k_7] + \\
 & + \frac{17.25}{16.76} [3(k_{17} - k_{10} - k_{13} - k_{15}) - k_6]; \quad (32)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 x_4 = & \frac{16}{76} [3(k_0 - k_1) + k_3 + k_4 + k_5 + k_6 + k_7] + \\
 & + \frac{25}{76} [3(k_8 + k_9 + k_{10} + k_{11}) - k_2] + \frac{25}{76} [3(k_{12} + k_{13} + k_{14} - k_8) - k_4] + \\
 & + \frac{28}{76} [3(k_{15} + k_{16} - k_9 - k_{12}) + k_0 - k_2 - k_5] + \\
 & + \frac{25}{76} [3(k_{17} - k_{10} - k_{13} - k_{15}) - k_6] + \frac{25}{76} [3(-k_{11} - k_{14} - k_{16} - k_{17}) - k_7]; \quad (33)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 x_5 = & \frac{17}{76} [3(k_0 - k_1) + k_3 + k_4 + k_5 + k_6 + k_7] + \\
 & + \frac{17.25}{16.76} [3(k_8 + k_9 + k_{10} + k_{11}) - k_2] + \frac{17.25}{16.76} [3(k_{12} + k_{13} + k_{14} - k_8) - k_4] + \\
 & + \frac{25}{76} [3(k_{15} + k_{16} - k_9 - k_{12}) + k_0 - k_2 - k_5] + \\
 & \qquad \qquad \qquad + \frac{501}{16.76} [3(k_{17} - k_{10} - k_{13} - k_{15}) - k_6] + \\
 & + \frac{17.25}{16.76} [3(-k_{11} - k_{14} - k_{16} - k_{17}) - k_7]; \quad (34)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 x_6 = & \frac{17}{76} [3(k_0 - k_1) + k_3 + k_4 + k_5 + k_6 + k_7] + \\
 & + \frac{17.25}{16.76} [3(k_8 + k_9 + k_{10} + k_{11}) - k_2] + \frac{17.25}{16.76} [3(k_{12} + k_{13} + k_{14} - k_8) - k_4] + \\
 & + \frac{25}{76} [3(k_{15} + k_{16} - k_9 - k_{12}) + k_0 - k_2 - k_5] + \\
 & \qquad \qquad \qquad + \frac{17.25}{16.76} [3(k_{17} - k_{10} - k_{13} - k_{15}) - k_6] +
 \end{aligned}$$

$$+ \frac{501}{16.76} [3(-k_{11} - k_{14} - k_{18} - k_{17}) - k_7]. \quad (35)$$

Определяем среднюю квадратическую погрешность условных уравнений

$$\sigma_4 = \sqrt{\frac{\sum P_i \sigma_i^2}{n - m}}, \quad (36)$$

где  $m$  — число неизвестных;  $n$  — число условных уравнений;  $n - m$  — число степеней свободы ( $n - m = 39 - 6 = 33$ ):

$$\begin{aligned} \sum P_i \sigma_i^2 = s^2 = & P_1 (x_1 - k_0 + k_1)^2 + P_2 (x_4 - k_0 + k_2)^2 + P_2 (x_1 - x_2 - k_3)^2 + \\ & + P_2 (x_1 - x_3 - k_4)^2 + P_2 (x_1 - x_4 - k_5)^2 + P_2 (x_1 - x_5 - k_6)^2 + \\ & + P_2 (x_1 - x_6 - k_7)^2 + P_1 (x_2 - x_3 - k_8)^2 + P_1 (x_2 - x_4 - k_9)^2 + \\ & P_1 (x_2 - x_5 - k_{10})^2 + P_1 (x_2 - x_6 - k_{11})^2 + P_1 (x_3 - x_4 - k_{12})^2 + \\ & + P_1 (x_2 - x_5 - k_{13})^2 + P_1 (x_3 - x_6 - k_{14})^2 + P_1 (x_4 - x_5 - k_{15})^2 + \\ & + P_1 (x_4 - x_6 - k_{16})^2 + P_1 (x_5 - x_6 - k_{17})^2. \quad (37) \end{aligned}$$

Определяем средние квадратические погрешности результатов по формулам:

$$\begin{aligned} s_{x_1} &= \frac{\sigma_4}{\sqrt{P_{x_1}}}; & s_{x_2} &= \frac{\sigma_4}{\sqrt{P_{x_2}}}; & s_{x_3} &= \frac{\sigma_4}{\sqrt{P_{x_3}}}; & s_{x_4} &= \frac{\sigma_4}{\sqrt{P_{x_4}}}; \\ s_{x_5} &= \frac{\sigma_4}{\sqrt{P_{x_5}}}; & s_{x_6} &= \frac{\sigma_4}{\sqrt{P_{x_6}}}, \end{aligned} \quad (38)$$

где  $P_{x_1}, P_{x_2}, P_{x_3}, P_{x_4}, P_{x_5}$  и  $P_{x_6}$  — веса неизвестных:

$$\begin{aligned} \frac{1}{P_{x_1}} &= b_{11}^{(-1)}; & \frac{1}{P_{x_2}} &= b_{22}^{(-1)}; & \frac{1}{P_{x_3}} &= b_{33}^{(-1)}; & \frac{1}{P_{x_4}} &= b_{44}^{(-1)}; \\ \frac{1}{P_{x_5}} &= b_{55}^{(-1)}; & \frac{1}{P_{x_6}} &= b_{66}^{(-1)}. \end{aligned} \quad (39)$$

#### Обработка результатов сличений эталонов-копий с первичным эталоном

Перед сличениями поверхность всех эталонов очищалась от загрязнений. Опыт работы с точными гирями показывает, что метод очистки поверхности от загрязнений играет существенную роль в стабильности их массы.

В Международном бюро мер и весов проведено ряд исследований по улучшению методики очистки поверхности эталонов массы, выполненных из платиноиридиевого сплава и нержавеющей стали. Установлено, что если платиноиридиевые эталоны сначала очистить спиртом или бензином, а затем промывать парами дважды дистиллированной воды, то это вызовет новое уменьшение их массы в среднем на 0,019 мг. Вместе с тем промывание гирь только парами дважды дистиллированной воды недостаточно, этому должно предшествовать очистка с помощью растворителя. В особенности это касается гирь, которые имеют явные следы загрязнения. В качестве растворителя следует применять спирт-ректификат или бензин. Опыты показывают, что очистка гирь растворителем не вредна. Очевидно, что очистка должна быть дополнена промывкой парами воды, устраняющей с поверхности гирь остатки от испарений растворяющей жидкости.

На основании этого Международное бюро мер и весов рекомендует для очистки поверхности платиноиридиевых гирь следующий метод. Вначале

поверхность гирь протирается замшей, смоченной чистым спиртом или бензином, а затем промывается парами дважды дистиллированной воды. Этот метод очистки был применен для эталонов из платиноиридиевого сплава.

Указанный выше метод очистки поверхности не пригоден для промывки поверхности эталонов массы из нержавеющей стали, так как он вызывает нестабильность массы этих гирь до 0,01—0,02 мг, которая сохраняется в течение двух-трех лет. Во ВНИИМ, так же как и в Международном бюро мер и весов, поверхность этих эталонов очищают, протирая их замшей, смоченной в спирте.

Перед проведением сличений эталонные веса были отъюстированы (цена деления весов установлена равной 0,025 мг), а используемые барометр, психрометр, термометры — поверены.

Сличения эталонов в соответствии с изложенной выше методикой, включающей 240 отдельных взвешиваний, производились в течение 1969 г. Наибольшие трудности представили сличения гирь из нержавеющей стали с гирями из платиноиридиевого сплава. Поправка результата взвешивания на действие аэростатической силы при сличениях этих гирь составляет 90 мг, при этом она должна быть определена с погрешностью, не превышающей 0,002—0,003 мг.

Эта поправка рассчитывается на основании измеренных значений атмосферного давления, влажности воздуха и его температуры. В качестве константы в формулу входит значение плотности сухого воздуха при температуре 0° С и атмосферном давлении 760 мм рт. ст.

Для расчета поправки на аэростатическую силу с указанной выше точностью необходимо определить давление с погрешностью, не превышающей 0,05 мм рт. ст., и влажность воздуха с погрешностью 5%. При устойчивых метеорологических условиях во время сличений это осуществимо. Если же плотность воздуха значительно изменяется, то поправка на аэростатическую силу, вычисленная на основании измерений, произведенных в конце взвешивания, будет содержать значительную погрешность. В связи с этим во ВНИИМ проводятся работы по созданию установки для непосредственных измерений плотности воздуха в помещении, в котором производится сличения эталонов.

В табл. 2 приведены значения  $k_1$ , полученные в результате сличений. Каждое значение  $k_1$  получено как среднее из 10—20 взвешиваний. Поправка  $k_0$  первичного эталона килограмма № 12 равна +0,085 мг. Подставив значения  $k_1$  и  $P_1 = 3$ ,  $P_2 = 1$  в формулы (30)—(36), (38), получим значения массы эталонов-копий с соответствующими средними квадратическими погрешностями результата:

| Эталон-копия                                       | Масса, г               |
|--|------------------------|
| $R_1 \frac{\text{Pt Ir}}{1 \text{ кг}}$ . . . . .  | 999,996834 ± 0,000009  |
| $B \frac{\text{ст}}{1 \text{ кг}}$ № 6 . . . . .   | 1000,003279 ± 0,000011 |
| $B \frac{\text{ст}}{1 \text{ кг}}$ № 8 . . . . .   | 1000,003593 ± 0,000011 |
| $B \frac{\text{ст}}{1 \text{ кг}}$ № 15 . . . . .  | 1000,003666 ± 0,000011 |
| $B \frac{\text{ст}}{\text{кг}}$ № 13* . . . . .    | 1000,004109 ± 0,000011 |
| $B \frac{\text{ст}}{1 \text{ кг}}$ № 16* . . . . . | 1000,004507 ± 0,000011 |

\* Эти гири в качестве эталонов-копий не утверждены.



Таблица 2

| Порядковый номер сличения | Сличаемый эталон                        | Эталон-копия, с которым сличается       | Разность поправок, $\mu\text{г}$ |
|---------------------------|---|---|----------------------------------|
| 1                         | № 12                                    | $R_1 \frac{\text{PtIr}}{1 \text{ кг}}$  | $k_1 = + 3,2610$                 |
| 2                         | № 12                                    | $B \frac{\text{CT}}{1 \text{ кг}}$ № 15 | $k_2 = - 3,6178$                 |
| 3                         | $R_1 \frac{\text{PtIr}}{1 \text{ кг}}$  | $H \frac{\text{CT}}{1 \text{ кг}}$ № 8  | $k_3 = - 6,7198$                 |
| 4                         | $R_1 \frac{\text{PtIr}}{1 \text{ кг}}$  | $B \frac{\text{CT}}{1 \text{ кг}}$ № 6  | $k_4 = - 6,4630$                 |
| 5                         | $R_1 \frac{\text{PtIr}}{1 \text{ кг}}$  | $B \frac{\text{CT}}{1 \text{ кг}}$ № 15 | $k_5 = - 6,8212$                 |
| 6                         | $R_1 \frac{\text{PtIr}}{1 \text{ кг}}$  | $B \frac{\text{CT}}{1 \text{ кг}}$ № 13 | $k_6 = - 7,3178$                 |
| 7                         | $R_1 \frac{\text{PtIr}}{1 \text{ кг}}$  | $B \frac{\text{CT}}{1 \text{ кг}}$ № 16 | $k_7 = - 7,6224$                 |
| 8                         | $H \frac{\text{CT}}{1 \text{ кг}}$ № 8  | $B \frac{\text{CT}}{1 \text{ кг}}$ № 6  | $k_8 = + 0,3116$                 |
| 9                         | $H \frac{\text{CT}}{1 \text{ кг}}$ № 8  | $B \frac{\text{CT}}{1 \text{ кг}}$ № 15 | $k_9 = - 0,0592$                 |
| 10                        | $H \frac{\text{CT}}{1 \text{ кг}}$ № 8  | $B \frac{\text{CT}}{1 \text{ кг}}$ № 13 | $k_{10} = - 0,5190$              |
| 11                        | $H \frac{\text{CT}}{1 \text{ кг}}$ № 8  | $B \frac{\text{CT}}{1 \text{ кг}}$ № 6  | $k_{11} = - 0,9104$              |
| 12                        | $B \frac{\text{CT}}{1 \text{ кг}}$ № 6  | $B \frac{\text{CT}}{1 \text{ кг}}$ № 15 | $k_{12} = - 0,3880$              |
| 13                        | $B \frac{\text{CT}}{1 \text{ кг}}$ № 6  | $B \frac{\text{CT}}{1 \text{ кг}}$ № 13 | $k_{13} = - 0,8306$              |
| 14                        | $B \frac{\text{CT}}{1 \text{ кг}}$ № 6  | $B \frac{\text{CT}}{1 \text{ кг}}$ № 16 | $k_{14} = - 1,2350$              |
| 15                        | $B \frac{\text{CT}}{1 \text{ кг}}$ № 15 | $B \frac{\text{CT}}{1 \text{ кг}}$ № 13 | $k_{15} = - 0,4434$              |
| 16                        | $B \frac{\text{CT}}{1 \text{ кг}}$ № 15 | $B \frac{\text{CT}}{1 \text{ кг}}$ № 16 | $k_{16} = - 0,8398$              |
| 17                        | $B \frac{\text{CT}}{1 \text{ кг}}$ № 13 | $B \frac{\text{CT}}{1 \text{ кг}}$ № 16 | $k_{17} = - 0,4160$              |

При проведении круговых сличений два эталона-копии  $R_1 \frac{\text{Pt Ir}}{1 \text{ кг}}$  и  $B \frac{\text{ст}}{1 \text{ кг}}$  № 15 сличались непосредственно с прототипом № 12. Если рассчитать массу этих эталонов только по результатам непосредственных сличений их с прототипом № 12, то для эталонов  $R_1 \frac{\text{Pt Ir}}{1 \text{ кг}}$  и  $B \frac{\text{ст}}{1 \text{ кг}}$  № 15 получим соответственно значения массы  $999,996824 \pm 0,0000051 \text{ г}$  и  $1000,003703 \pm \pm 0,0000120 \text{ г}$ . Расхождения в значениях массы, полученных для этих эталонов по непосредственным сличениям с прототипом № 12 и по всем произведенным сличениям, лежат в пределах 3σ. Это свидетельствует о том, что в измерениях нет систематических погрешностей.

Для большей достоверности сличений в конце всех измерений производились сличения эталона-копии  $R_1 \frac{\text{Pt Ir}}{1 \text{ кг}}$  с эталоном-свидетелем Государственного эталона килограмма № 26, который сличается в Международном бюро мер и весов, как и прототип № 12.

В результате этих измерений получено значение массы  $R_1 \frac{\text{Pt Ir}}{1 \text{ кг}}$ , равное  $999,996826 \pm 0,0000032 \text{ г}$ , которое всего на 0,002 мг отличается от значения массы, полученного при сличениях эталона  $R_1 \frac{\text{Pt Ir}}{1 \text{ кг}}$  с прототипом № 12. Следует подчеркнуть, что погрешность измерения массы национальных прототипов килограмма в Международном бюро мер и весов составляет 0,002 мг [1].

Последние контрольные сличения  $R_1 \frac{\text{Pt Ir}}{1 \text{ кг}}$  с № 26 убедительно показали, что в измерениях нет значительных по величине систематических погрешностей и что Государственный эталон килограмма СССР — прототип № 12 и эталон-свидетель — прототип № 26 находятся в хорошем состоянии.

Результаты сличений эталона-копии  $R_1 \frac{\text{Pt Ir}}{1 \text{ кг}}$  с прототипами № 12 и 26 не имеют погрешностей, вызванных действием аэростатической силы на сличаемые гири, т. е. эти измерения более точные, чем те, в которых сличаются гири со значительно отличающимися объемами. В связи с этим было решено принять массу эталона-копии  $R_1 \frac{\text{Pt Ir}}{1 \text{ кг}}$  только на основании сличений его с прототипом № 12 и 26.

В табл. 3 даны значения массы эталонов-копий и гирь  $B \frac{\text{ст}}{1 \text{ кг}}$  № 13 и  $B \frac{\text{ст}}{1 \text{ кг}}$  № 16, а также значения массы этих гирь по сличениям в 1959 г. и изменение массы эталонов за десятилетний срок их эксплуатации.

Как видно из данных табл. 3, масса эталонов-копий уменьшилась, т. е. все эталоны износились. Масса эталона-копии из платиноиридиевого сплава  $R_1 \frac{\text{Pt Ir}}{1 \text{ кг}}$  уменьшалась всего на 0,057 мг, эталоны из нержавеющей стали износились примерно в три раза больше, чем гиря  $R_1 \frac{\text{Pt Ir}}{1 \text{ кг}}$ .

Со времени введения новых эталонов-копий и рабочих эталонов массы из нержавеющей стали прошло тринадцать лет [3]. За десять лет эксплуатации масса эталонов-копий из нержавеющей стали уменьшилась на

Таблица 3

| Эталон-копия                             | Масса (в г) по сличениям в 1968—1969 гг. | Масса (в г) по сличениям в 1959 г. | Изменение массы (в мг) за 10 лет |
|--|--|------------------------------------|----------------------------------|
| $R_1 \frac{PtIr}{1 \text{ кг}}$          | 999,996825 ± 0,0000042                   | 999,996882                         | -0,057                           |
| $B \frac{ст}{1 \text{ кг}} \text{ № 6}$  | 1000,003279 ± 0,000011                   | 1000,003466                        | -0,187                           |
| $B \frac{ст}{1 \text{ кг}} \text{ № 8}$  | 1000,003593 ± 0,000011                   | 1000,003746                        | -0,153                           |
| $B \frac{ст}{1 \text{ кг}} \text{ № 15}$ | 1000,003666 ± 0,000011                   | 1000,003838                        | -0,172                           |
| $B \frac{ст}{1 \text{ кг}} \text{ № 13}$ | 1000,004109 ± 0,000011                   | —                                  | —                                |
| $B \frac{ст}{1 \text{ кг}} \text{ № 16}$ | 1000,004507 ± 0,000011                   | —                                  | —                                |

0,15—0,19 мг, а масса рабочих эталонов из того же материала за тринадцать лет применения — примерно на 0,5 мг. Применявшиеся до 1956 г. рабочие эталоны массы из золоченой бронзы за один год эксплуатации уменьшались на 0,5—1,0 мг.

По рабочим эталонам поверяются образцовые гири 1-го разряда, у которых погрешность определения массы килограммовой гири составляет 0,2 мг. Следовательно, погрешность определения и стабильность массы рабочих эталонов за два года (срок между поверками рабочих эталонов) должна быть 0,07—0,1 мг, эталонов-копий — 0,023—0,033 мг. Новые рабочие эталоны из нержавеющей стали удовлетворяют указанным выше требованиям с некоторым запасом точности.

Аттестовать эталоны-копии с погрешностью, не превышающей 0,023—0,033 мг, не представляет трудностей; сложное обстоит дело со стабильностью массы эталонов-копий из нержавеющей стали; сличения показали, что масса этих эталонов-копий изменяется между поверками при сроке в 10 лет значительно больше. В связи с этим срок между поверками эталонов-копий придется сократить до 6—7 лет и одновременно увеличить количество эталонов-копий до шести гирь с равномерным использованием всех гирь в период между их поверками.

В ближайшие годы будет проводиться работа по изысканию более стабильного материала для создания новых эталонов-копий. Желательно, чтобы плотность выбранного материала была близка к  $8,0 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ .

#### Создание двух точных гирь с целью пополнения группы эталонов-копий

При выборе материала для изготовления эталонов массы исходят из соображений наибольшего постоянства их массы. Вторичные эталоны целесообразно изготовлять из высокостабильного, но дорогого платиноиридиевого сплава. Плотность материала эталонов должна быть близка к  $8,0 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ , так как образцовые гири изготовлены из нержавеющей стали; в этом случае погрешности в сличениях образцовых гирь с эталонами из-за действия аэро-статической силы будут минимальными.

В Международном бюро мер и весов и во ВНИИМ в течение ряда лет проводились работы по выбору материала для изготовления эталонов массы [4, 5, 6]. Наиболее износостойкими оказались гири из нержавеющей стали. К точным гирям предъявляются очень жесткие требования в отношении антимагнитности, так как если гиря магнитна, то изменение положения ее в пространстве вызывает кажущееся изменение ее массы. Размагничивание гири не приводит к желаемым результатам, так как такая гиря вновь намагничивается блуждающими магнитными полями. С учетом вышеназложенных требований было решено изготовить новые эталоны массы из нержавеющей стали марки Х23Н18.

В 1965 г. было изготовлено пятнадцать штук килограммовых гирь в форме прямых цилиндров с закругленными ребрами, высота и диаметр гирь равны 56 мм. Поверхность гирь обработана по 13—14-му классам шероховатости поверхности.

Предполагается группу эталонов-копий пополнить двумя гирями, на поверхности которых нанесены № 13 и 16. Измерение магнитных характеристик материала гирь производилось на статическом магнитометре\*. Магнитный момент при полном насыщении гири № 13 оказался равным 0,038 ед. CGSM и гири № 16 — 0,053 ед. CGSM.

При точных взвешиваниях и поверках в результате взвешивания вводятся поправки из-за разности аэростатических сил, действующих на сравниваемые гири. Для этого необходимо знать объемы сравниваемых гирь. Объем эталонов-копий должен быть известен с погрешностью, не превышающей 0,002 см<sup>3</sup>. Объем гирь определялся методом гидростатического взвешивания [7]. Использовалась установка, состоящая из весов фирмы «Эрлинг» (цена деления весов 0,3 мг), термостатной ванны с водой второй перегонки и терморегулятора типа ТС.

Температура дистиллированной воды измерялась двумя термометрами с ценой деления 0,005° С; исследуемые гири подвешивались в воде к чашке весов с помощью стальной проволоки диаметром 0,2 мм. В опытах использовалась свежая дистиллированная вода второй перегонки. Перед проведением опытов из воды был удален воздух путем откачки в течение четырех часов, затем давление было вновь доведено до атмосферного. Объем каждой гири определялся шесть раз двумя наблюдателями. Результаты опытов приведены в табл. 4.

Таблица 4

| Гиря № 13  |  | Гиря № 16                        |  |
|--|--|----------------------------------|--|
| объем при 20° С, см <sup>3</sup>                             | средняя квадратическая погрешность ряда измерений, см <sup>3</sup> | объем при 20° С, см <sup>3</sup> | средняя квадратическая погрешность ряда измерений, см <sup>3</sup> |
| 126,9468   | —0,0009 *  | 126,9729                         | 0,0040   |
| 126,9477   |  | 126,9705                         |  |
| 126,9455   |  | 126,9661                         |  |
| 126,9452   |  | 126,9645                         |  |
| 126,9459   |  | 126,9637                         |  |
| 126,9466   |  | 126,9629                         |  |
| Среднее значение объема<br>126,9463 ± 0,0004 см <sup>3</sup> |  |                                  |  |

\* См. статью Н. А. Смирновой, М. Н. Мошковой и А. Т. Руденко. «Установка для определения магнитного момента гирь» в настоящем сборнике, стр. 63.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Travaux et mémoires du Bureau International des poids et mesures, t. 22, f. 3, Paris, 1966.
2. Смирнова Н. А. Оценка погрешностей при сличениях эталонокпий с первичным эталоном единицы массы СССР и некоторые изменения в пользовании ими. Труды ВНИИМ, вып. 57 (117), Стандартгиз, 1962.
3. Смирнова Н. А. Новые копии эталона единицы массы. «Измерительная техника», 1960, № 4.
4. Крахмальникова Г. А. О коррозии золоченых гирь. Труды ВНИИМ, вып. 27 (87), Машгиз, 1955.
5. Вонхоуге А. Microtecnic, 1952, № 3.
6. Standards of mass NBS. Technical News. Bulletin, 1951, 35 N 1.
7. Смирнова Н. А. и Торопки С. И. Определение плотности твердых тел. «Измерительная техника», 1967, № 4.

Поступила в редакцию 16/IV 1970 г.

УДК 681.26.074.089.6

Н. А. СМЕРНОВА, М. И. ТЮТИКОВА  
ВНИИМ

### НАБОРЫ РАБОЧИХ ЭТАЛОННЫХ ГИРЬ МАССОЙ ОТ 1 ДО 10 кг

ГОСТ 14636—69 «Поверочная схема для гирь и весов», помимо рабочих эталонов единицы массы — гирь в 1 кг, предусматривает наборы рабочих эталонных гирь массой от 1 до 500 г и от 1 до 20 кг. Эти гири необходимы для проверки образцовых гирь 1-го разряда по ГОСТ 12656—69 «Гири образцовые» и гирь 1-го класса по ГОСТ 7328—65 «Гири общего назначения».

До 1964 г. в качестве рабочих эталонных гирь от 1 до 20 кг применялись гири из латуни или бронзы с золоченой поверхностью. Однако по своей точности эти гири уже не удовлетворяли новым требованиям, предъявляемым к эталонным гирям. Поэтому возникла необходимость создать новые наборы рабочих эталонных гирь. В 1964—1965 гг. во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева были созданы наборы эталонных гирь от 1 до 500 г из нержавеющей стали, а в 1965—1966 гг. — от 1 до 10 кг.

Основное требование, предъявляемое к точным гирям, — стабильность их массы во времени, — зависит от свойств материала, из которого изготовлены гири, качества изготовления гирь, а также от условий их хранения и применения.

В результате исследований, проведенных во ВНИИМ, для изготовления рабочих эталонов единиц массы была выбрана немагнитная нержавеющая сталь марки X18H9T, содержащая 18% Cr и 9% Ni. Из этой стали на заводе «Эталон» в г. Риге были изготовлены четыре набора килограммовых гирь в форме прямых цилиндров с головками; поверхность гирь — хромирована. Позднее было обнаружено, что в процессе механической обработки гирь магнитные характеристики этой стали изменяются, и поэтому для точных гирь была предложена другая марка нержавеющей стали X23H18, содержащая 23% Cr и 18% Ni.

К точным гирям (эталонам массы) предъявляются очень жесткие требования в отношении магнитных характеристик материала гирь. Если материал гири магнитен, то различная ориентация гири в пространстве вызывает кажущееся изменение ее массы.

Магнитные моменты всех четырех наборов гирь, механическая обработка которых была закончена, определялись на аstaticком магнитометре\*.

\* Подробнее об этом см. статью Н. А. Смирновой и Т. А. Руденко в настоящем сборнике, стр. 63.



Из гирь, имеющих наименьшие магнитные моменты, были составлены два набора (№ 213 и 214). Магнитные моменты гирь этих наборов в пересчете на 1 кг их массы оказались меньше 1 ед. CGSM. Ниже приводятся магнитные моменты гирь набора № 214.

|  |      |      |      |      |      |
|--|------|------|------|------|------|
| Масса гири, кг                         | 1    | 2    | 2    | 5    | 10   |
| Магнитный момент, приходящийся на 1 кг | 0,63 | 0,60 | 0,27 | 0,50 | 0,58 |

Шероховатость поверхностей гирь определялась на измерительном интерференционном микроскопе МИИ-4 путем измерения высоты гребешков неровностей по искривлению интерференционных полос трех поверхностей: основания гири, верхней плоскости головки и боковой поверхности корпуса. Установлено, что шероховатость поверхности гирь соответствует 13—14-му классам чистоты по ГОСТ 2789—59; это удовлетворяет предъявляемым к эталонным гирям требованиям.

В связи с тем, что аттестация и поверка рабочих эталонов производилась по действительной плотности материала гирь и действительной плотности воздуха во время сличений, в результате взвешивания вводится поправка на действие аэростатических сил из-за разности объемов сличаемых гирь. Поправка рассчитывается по формуле

$$\Delta m = (V_A - V_B) \rho, \quad (1)$$

где  $V_A$  и  $V_B$  — объемы сличаемых (поверяемой и образцовой) гирь  $A$  и  $B$ ;  $\rho$  — плотность воздуха.

Погрешность определения этой поправки

$$\sigma_{\Delta m} = \sqrt{\rho^2 \sigma_{V_A}^2 + \rho^2 \sigma_{V_B}^2 + (V_A - V_B)^2 \sigma_{\rho}^2}, \quad (2)$$

где  $\sigma_{V_A}$ ,  $\sigma_{V_B}$  и  $\sigma_{\rho}$  — погрешности определения объемов гирь  $A$  и  $B$  и погрешность определения плотности воздуха.

Полагая в уравнении (2) частные погрешности равновероятными, будем иметь

$$\rho \sigma_{V_A} = \rho \sigma_{V_B} = (V_A - V_B) \sigma_{\rho} = D. \quad (3)$$

Тогда

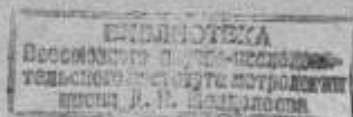
$$\sigma_{\Delta m} = D \sqrt{3}. \quad (4)$$

Чтобы погрешность  $\sigma_{\Delta m}$  не влияла на точность аттестации эталонных гирь, характеризуемую погрешностью  $\sigma_{пр}$ , необходимо соблюдать условие

$$\sigma_{\Delta m} < \frac{1}{3} \sigma_{пр}. \quad (5)$$

По ГОСТ 14636—69 погрешности определения массы рабочих эталонных гирь от 1 до 10 кг составляют  $1 \cdot 10^{-5}$  и  $5 \cdot 10^{-4}$  г. Имея в виду выражения (3), (4) и (5), погрешности определения объемов гирь должны быть не более  $\pm 0,002 \text{ см}^3$  для гирь массой 1 кг,  $\pm 0,01 \text{ см}^3$  — для гирь 2 кг,  $\pm 0,03 \text{ см}^3$  — для гирь 5 кг и  $\pm 0,08 \text{ см}^3$  — для гирь 10 кг.

Объемы гирь определялись методом гидростатического взвешивания на гидростатических весах до 2 кг с ценой делений 0,3 мг и до 20 кг с ценой деления 7 мг [1]. Вначале измерялась масса гири в воздухе, а затем в воде. Сосуд со свежей дважды дистиллированной водой помещался в термостатную ванну и с помощью терморегулятора в нем устанавливалась температура, близкая к 20° С. Вся гидростатическая установка находилась в термостатном помещении. Перед взвешиванием поверхность гирь промывалась спиртом и высушивалась. Гиря, укрепленная на подвесе, опускалась в воду и подвешивалась к чашке весов. Чтобы уменьшить силы сцепления между поверхностью воды и подвеской, для ее изготовления использовали проволоку из нержавеющей стали минимально допустимого диаметра.



Если при опускании в воду на поверхности гири обнаруживали пузырьки воздуха, то гирю вынимали из воды и, осторожно встряхивая, вновь опускали. Эту операцию приходилось иногда продлевать несколько раз. Подвешенную к чашке гирю уравнивали тарой на другой чашке и определяли положение равновесия коромысла весов. После этого определяли цену деления весов и температуру воды. Далее гирю вынимали из держателя и опускали на дно сосуда с водой. На чашку весов, с которой сняли гирю, помещали образцовые гири в таком количестве, чтобы положение равновесия коромысла было близким к первоначальному. Затем вновь определяли цену деления весов и температуру воды. Положение равновесия весов во всех случаях определяли не менее трех раз.

Объем гири при температуре измерения рассчитывался по формуле

$$V_t = \frac{m_1 - m_2 - (L_2 - L_1) S_{cp} - V_1 \epsilon_1 + V_2 \epsilon_2}{\rho_t - \epsilon_2} \quad (6)$$

где  $m_1$  и  $V_1$  — масса и объем гирь, уравнивающих гирю при взвешивании ее в воздухе;  $m_2$  и  $V_2$  — масса и объем гирь, уравнивающих гирю при взвешивании ее в воде;  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$  — плотность воздуха при взвешивании гири в воздухе и в воде;  $\rho_t$  — плотность воды при температуре измерения  $t$ ;  $L_1$  и  $L_2$  — положения равновесия коромысла;  $S_{cp}$  — среднее значение цены деления шкалы весов при взвешивании гири в воде.

Объем гири при температуре 20° С

$$V_{20} = V_t [1 + \beta (20 - t)], \quad (7)$$

где  $\beta$  — коэффициент объемного расширения материала гири.

Ввиду того, что использовались табличные значения коэффициента объемного расширения стали, из которой изготовлены гири, для уменьшения погрешности пересчета  $V_t$  на  $V_{20}$  измерения производились при температурах, близких к 20° С. Наибольшие отклонения температуры воды в цилиндре от 20° С составляли 0,07° С.

Как следует из выражения [6], погрешность объема гирь зависит от точности взвешивания гири в воздухе и в воде, а также от точности определения плотности воздуха и воды.

Задаваясь требуемой точностью объемов гирь и пользуясь формулами, приведенными в работе [1], рассчитывалась точность, с которой следует взвешивать гири в воздухе и в воде, а также плотность воздуха и воды при опыте. Установлено, что взвешивание гири в 1 кг должно производиться с погрешностью не более 0,002 г, при этом плотность воздуха и воды должна определяться с погрешностями, не превышающими соответственно 0,00002 г/см<sup>3</sup> и 0,000004 г/см<sup>3</sup>; взвешивание 10-килограммовой гири в воздухе и в воде должно производиться с погрешностью, не превышающей 0,08 г, а плотность воздуха и воды должна определяться с погрешностью не более 0,00007 г/см<sup>3</sup> и 0,00001 г/см<sup>3</sup> соответственно.

В действительности при определении объема гири массой 1 кг погрешности взвешивания были значительно меньше указанных выше, поскольку взвешивания производились на весах с ценой деления 0,3 мг. Плотность воздуха была определена также с меньшей погрешностью.

Значительно труднее определить плотность воды с требуемой точностью. Так, чтобы определить плотность воды с погрешностью  $4 \cdot 10^{-6}$  г/см<sup>3</sup>, необходимо во время измерения поддерживать постоянной температуру воды в пределах  $\pm 0,01^\circ$  С; с такой же точностью нужно измерить температуру воды в цилиндре. Наибольшее изменение температуры воды в цилиндре в наших опытах составляло 0,008° С; температура воды измерялась ртутным термометром с ценой деления 0,01°, отсчет показаний которого производился по микроскопу; это обеспечивало точность отсчета в пределах 0,1 деления. Термометр в ванне устанавливался таким образом, чтобы резервуар с ртутью находился на одном уровне с исследуемым образцом.

При определении объемов гирь массой 10 кг в качестве подвеса применялась незакаленная стальная проволока диаметром 1 мм; взвешивания

производились на весах грузоподъемностью 20 кг с ценой деления 7 мг; температура воды измерялась термометром с ценой деления 0,1° С; отсчет производился с помощью микроскопа. Температура воды при взвешивании изменялась не более чем на 0,02—0,03° С. Объем всех гирь определялся методом многократных измерений. Для каждой гири производилось не менее четырех измерений.

Таблица 1

| Номинальная масса гирь, кг | Объем гирь при 20° С, см <sup>3</sup> |             | Средняя квадратическая погрешность результата измерения, см <sup>3</sup> |
|----------------------------|---------------------------------------|-------------|--|
|                            | набор № 213                           | набор № 214 |  |
| 1                          | 126,6725                              | 126,8901    | 0,0006   |
| 2                          | 254,396                               | 254,397     | 0,003  |
| 2                          | 253,695                               | 253,704     | 0,003  |
| 5                          | 634,947                               | 633,749     | 0,008  |
| 10                         | 1270,03                               | 1270,02     | 0,02   |

В табл. 1 приведены значения объемов гирь наборов № 213 и 214 при 20° С и значения средней квадратической погрешности результатов измерений.

Как видно из данных таблицы, погрешности определения объемов гирь во всех случаях меньше допустимых значений.

Перед определением массы гирь просушивались в течение трех месяцев. Масса гирь в 1 кг определялась на метрологических весах до 1 мг № 1 фирмы Рупрехт путем многократного сличения с эталоном-копией из нержавеющей стали — гирей В  $\frac{\text{ст}}{1 \text{ кг}}$  № 6. Масса остальных гирь определялась методом калибрования на весах грузоподъемностью 5 и 20 кг с ценой деления соответственно 0,6 и 2,0 мг. Каждый набор был прокалиброван пять раз пятью наблюдателями. При сличении гирь в 2 кг в качестве исходных были использованы гири в 1 кг из калибруемого набора и рабочий эталон единицы массы ВНИИМ — гиря из нержавеющей стали В  $\frac{\text{ст}}{1 \text{ кг}}$  № 9. В табл. 2 представлены результаты аттестации гирь наборов № 213 и 214.

Таблица 2

| Номинальная масса гирь, кг | Действительная масса гирь, г |             | Средняя квадратическая погрешность определения массы, г |
|----------------------------|------------------------------|-------------|---|
|                            | набор № 213                  | набор № 214 |   |
| 1                          | 1000,00425                   | 1000,00471  | $1 \cdot 10^{-5}$                                       |
| 2                          | 2000,0067                    | 2000,0141   | $1 \cdot 10^{-4}$                                       |
| 2                          | 2000,0049                    | 2000,0110   | $1 \cdot 10^{-4}$                                       |
| 5                          | 4999,9800                    | 5000,0174   | $2 \cdot 10^{-4}$                                       |
| 10                         | 10000,0336                   | 10000,0431  | $5 \cdot 10^{-4}$                                       |

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Смирнова Н. А., Торолин С. И. Определение плотности твердых тел. «Измерительная техника», 1967, № 4.

Поступила в редакцию 30/XII 1970 г.

## ОБРАЗЦОВЫЕ ВЕСЫ ВЫСОКОЙ ТОЧНОСТИ

За последние годы значительно возросли требования к точности измерения массы, а следовательно, и к гилям, применяемым при взвешиваниях. В связи с этим был разработан ГОСТ 7328—65 «Гири общего назначения», в котором все рабочие гири в зависимости от точности подразделены на пять классов. Допускаемые отклонения массы гирь от их номинального значения установлены такими, чтобы гири всех классов можно было использовать без учета их поправок, т. е. по номинальной массе. Такое применение гирь очень удобно, однако это привело к необходимости значительно повысить точность гирь, и прежде всего гирь 1- и 2-го классов. Потребовалось также значительно повысить точность образцовых гирь, служащих для проверки гирь общего назначения.

Существовавшие образцовые весы уже не отвечали возросшим требованиям на гири и не обеспечивали необходимую точность их проверки. Необходимо было разработать новые требования на образцовые весы. Поскольку точность взвешивания на весах зависит прежде всего от их основных метрологических характеристик, т. е. от цены деления, стандартного отклонения (или вариации показаний) и погрешности от неравноплечести коромысла, эти характеристики следовало определить для всей группы образцовых весов. При разработке указанных характеристик руководствовались необходимой точностью проверки образцовых и рабочих гирь.

В стандартах на гири указаны наибольшие допускаемые отклонения массы гирь от их номинального значения  $\delta_{\text{доп}}$  и наибольшие погрешности определения массы гирь  $\delta_{\text{пр}}$ . Соотношение между этими величинами для разных гирь различно: для образцовых гирь 1-го разряда и гирь 1-го класса

$$\delta_{\text{пр}} = \frac{1}{2} \delta_{\text{доп}}$$

для образцовых гирь 2- и 3-го разрядов и гирь 2- и 3-го классов

$$\delta_{\text{пр}} = \frac{1}{3} \delta_{\text{доп}}$$

для всех остальных гирь  $\delta_{\text{пр}} = \frac{1}{4} \delta_{\text{доп}}$ .

Остановимся на выборе оптимального значения цены деления шкалы весов. Известно, что точные весы, к числу которых относятся образцовые весы 1-го разряда повышенной точности, 1- и 2-го разрядов, предназначаются для многократных измерений. Для таких весов при выборе цены деления рекомендуется [1] пользоваться неравенством

$$0,5 < \frac{a}{\sigma} < 1, \quad (1)$$

где  $\sigma$  — стандартное отклонение;  $a$  — погрешность отсчета по шкале весов, которая, как показала практика работы на точных весах, не превосходит 0,15 деления.

Принимая для этой группы весов отношение  $\frac{a}{\sigma} = 0,5$ , будем иметь  $\sigma = 2a = 0,3$  дел.

С другой стороны,  $\sigma = \frac{1}{3} \delta_{\text{пр}}$ .

Пользуясь этим равенством и зная предельные погрешности определения массы гирь  $\delta_{\text{пр}}$ , можно рассчитать цену деления шкалы весов, например, образцовых весов 1-го разряда повышенной точности до 1 кг, предназначенных для проверки образцовых гирь 1-го разряда и гирь 1-го класса. Наименьшая по массе гиря, поверяемая на этих весах, 500 г. Для нее по ГОСТ 7328—65  $\delta_{\text{пр}} = \pm 0,15$  мг и  $\sigma = \pm 0,053$  мг. Следовательно, цена деления шкалы

должна быть  $s = 0,18$  мг. Таким образом были рассчитаны цены деления для образцовых весов 1-го разряда повышенной точности, 1- и 2-го разрядов всех грузоподъемностей.

Образцовые весы 3- и 4-го разрядов предназначены для проверки образцовых гирь 4-го разряда, гирь 4- и 5-го классов и условных гирь. Эти гири проверяются методом однократного взвешивания. Для этого случая в работе [1] рекомендуется неравенство  $2,5 < \frac{a}{\sigma} < 3,5$ .

Принимая для этой группы весов  $\frac{a}{\sigma} = 2,5$  и  $a = 0,5$  дел., будем иметь  $\sigma = 0,2$  дел. По известным значениям  $\sigma$  и  $\delta_{\text{пл}}$  были рассчитаны значения цен деления и для этой группы образцовых весов.

Величина неравноплечести коромысла для точных образцовых весов (включая образцовые весы 2-го разряда) не имеет существенного значения, так как на этих весах применяются только методы точного взвешивания, при которых погрешность от неравноплечести коромысла исключается из результата взвешивания. Однако для удобства работы необходимо, чтобы при проверке гирь положение равновесия коромысла во всех случаях оставалось в пределах шкалы весов.

Изменение положения равновесия коромысла при сличении гирь зависит от разности масс образцовой и поверяемой гирь и от неравноплечести коромысла. Согласно действующим в СССР нормативным документам, разность масс образцовой и поверяемой гирь не превосходит 0,5 объема шкалы весов, на которых поверяются гири.

Исходя из изложенного выше погрешность от неравноплечести коромысла в зависимости от грузоподъемности весов была назначена в пределах 15—25 делений для образцовых весов 1-го разряда повышенной точности, 10—15 делений для образцовых весов 1-го разряда и 5—10 делений для образцовых весов 2-го разряда.

Для образцовых весов 3- и 4-го разрядов погрешность от неравноплечести коромысла установлена значительно меньшей, так как эти веса могут быть использованы и для обычных простых взвешиваний. Так, для образцовых весов 4-го разряда погрешность от неравноплечести коромысла должна быть не более 0,5—1,0 деления шкалы.

Погрешность взвешивания, а следовательно, и погрешность определения массы гирь зависит также от постоянства показаний весов, характеризуемого стандартным отклонением (или вариацией показаний) весов. Как уже было указано, проверка гирь производится одним из методов точного взвешивания и преимущественно методом замещения или взвешивания на одном плече.

При сличении гирь методом замещения уравнение взвешивания можно написать в виде

$$A = B + w \frac{r}{w_s} \quad (1)$$

Здесь  $A$  — действительное значение массы поверяемой гири;  $B$  — действительное значение массы образцовой гири;  $r$  — масса гири, используемой для определения цены деления;  $w$  — число делений, на которое изменится положение равновесия коромысла при замене поверяемой гири на образцовую;  $w_s$  — число делений, на которое изменится положение равновесия коромысла при добавлении на чашку гири  $r$ .

Таким образом, погрешность определения массы поверяемой гири зависит от погрешностей образцовых гирь  $B$  и  $r$  и от погрешностей определения значений  $w$  и  $w_s$ .

Из уравнения (1) находим

$$\sigma_A = \left( \frac{\partial A}{\partial B} \right)^2 \sigma_B^2 + \left( \frac{\partial A}{\partial r} \right)^2 \sigma_r^2 + \left( \frac{\partial A}{\partial w} \right)^2 \sigma_w^2 + \left( \frac{\partial A}{\partial w_s} \right)^2 \sigma_{w_s}^2 \quad (2)$$



Обычно гиря  $g$  подбирается такой массы, чтобы от добавления ее на чашку положение равновесия коромысла изменилось не менее чем на четверть шкалы.

Обозначив число делений шкалы через  $N$  и цену деления весов через  $s$ , будем иметь

$$\omega_s = \frac{N}{4} \text{ и } \omega = \frac{\Delta m}{s},$$

где  $\Delta m$  — сумма допускаемых отклонений от номинальной массы поверяемой и образцовой гирь.

Из выражения (2), приняв  $\sigma_w = \sigma_{w_s}$  и пренебрегая членом, содержащим погрешность  $\sigma_r$ , как малым, получим

$$\sigma_w^2 = \frac{N^2(\sigma_A^2 - \sigma_B^2)}{(sN)^2 - 16\Delta m^2} \quad (3)$$

По уравнению (3) для всех образцовых весов рассчитаны допускаемые значения  $\sigma_w$  весов, при которых обеспечивается требуемая точность поверки образцовых и рабочих гирь. Проиллюстрируем это на примере весов 1-го разряда до 1 кг. Наименьшая по массе гиря, поверяемая на этих весах, 500 г. По ГОСТ 7328-65 для нее  $\sigma_{пр} = \pm 0,53 \text{ мг}$  и, следовательно,  $\sigma_A = \pm 0,18 \text{ мг}$ . Поверяется она по образцовой гире 1-го разряда 500 г, для которой  $\delta_{пр} = \pm 0,16 \text{ мг}$  и  $\sigma_B = \pm 0,053 \text{ мг}$ . Цена деления весов  $s = 0,5 \text{ мг}$ ,  $N = 200$  делениям и  $\Delta m = 1,92 \text{ мг}$ . Подставив указанные значения в выражение (3), получим  $\sigma_w = 0,34$  деления.

На практике удобнее пользоваться не стандартным отклонением, а вариацией показаний весов, которая регламентируется в стандартах на поверку весов. Пересчет одной величины на другую несложен, так как вариация показаний  $\Delta$  связана с  $\sigma_w$  определенным соотношением в зависимости от числа измерений. Для наиболее часто применяемых при поверке весов числа измерений эти соотношения будут следующими:

$$\frac{\Delta_5}{\sigma_w} = 2,3; \quad \frac{\Delta_{10}}{\sigma_w} = 3,1; \quad \frac{\Delta_{20}}{\sigma_w} = 3,7.$$

Здесь  $\Delta_5$ ,  $\Delta_{10}$  и  $\Delta_{20}$  — вариация показаний весов, вычисленные соответственно из 5, 10 и 20 измерений.

Значения цен деления, погрешностей от неравноплечести коромысла и вариации показаний для образцовых весов всех разрядов, рассчитанные на основании приведенных выше данных, были введены в стандарты СССР по поверке образцовых весов и образцовых и рабочих гирь. Эти характеристики легли в основу при разработке технических заданий на проектирование образцовых весов.

Анализ таблицы основных метрологических характеристик образцовых весов показал, что отечественной промышленностью ранее не выпускались образцовые весы 1-го разряда на 5 и 20 кг и образцовые весы 1-го разряда повышенной точности на 200 г, 2 г и 1 кг. Особую трудность представляет изготовление весов 1-го разряда повышенной точности на 2 г и 1 кг. Поэтому было решено предварительно разработать весы с несколько худшими характеристиками с тем, чтобы в дальнейшем на базе созданных весов добиться создания весов с более высокими характеристиками.

Опытные образцы этих весов, изготовленные заводом «Госметр», относятся к разряду весов высокого класса точности и имеют некоторые конструктивные особенности по сравнению с обычными равноплечими лабораторными весами, а именно: в них нет рейтерных шкал, так как они вносят дополнительные погрешности в результат взвешивания, и нет успокоителей.

Для уменьшения температурных влияний свободное пространство витрины имеет минимальные размеры, а коромысло отделено от остального пространства витрины стеклянной или металлической перегородкой. В весах грузо-

подъемностью 1,5 и 20 кг предусмотрены механизмы гириаложения, обеспечивающие постоянство и центричность расположения гирь на чашках весов.

В таблице приведены метрологические характеристики разработанных весов.



Рис. 1. Образцовые весы 1-го разряда повышенной точности до 2 г

Рис. 2. Образцовые весы 1-го разряда повышенной точности до 200 г

Ниже приводится краткое описание конструкции весов.

В основу конструкции образцовых весов 1-го разряда повышенной точности до 2 г (рис. 1) положен принцип крутильных весов с равноплечим коромыслом. Коромысло выполнено в виде треугольной фермы из кварцевых трубок. Опорная и грузоприемные растяжки металлические, коромысло к опорной растяжке прикреплено эпоксидной смолой, грузоприемные растяжки закреплены между плоскостями пластинок.

| Тип весов               | Метрологические характеристики |                        |                   |  |
|-------------------------|--------------------------------|------------------------|-------------------|--|
|                         | максимальная нагрузка          | цена деления шкалы, мг | вариац. весов, мг | погрешность от неравноплечести коромысла, мг |
| ВЛО-2г-1 <sup>б</sup>   | 2 г                            | 0,005                  | 0,007             | 0,15   |
| ВЛО-200г-1 <sup>а</sup> | 200 г                          | 0,05                   | 0,05              | 2,0  |
| ВЛО-1кг-1 <sup>б</sup>  | 1 кг                           | 0,32                   | 0,32              | 5,0  |
| ВЛО-5кг-1               | 5 кг                           | 1                      | 1,0               | 10,0   |
| ВЛО-20кг-1              | 20 кг                          | 5,0                    | 5,0               | 50,0   |

Узел коромысла смонтирован в контейнере, предохраняющем коромысло от загрязнения и действия воздушных потоков и одновременно служащим теплораспределителем. Подвески чашек — кварцевые; снятие и навешива-

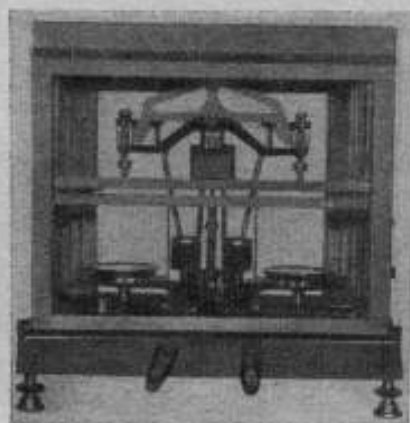


Рис. 3. Образцовые весы 1-го разряда повышенной точности до 1 кг

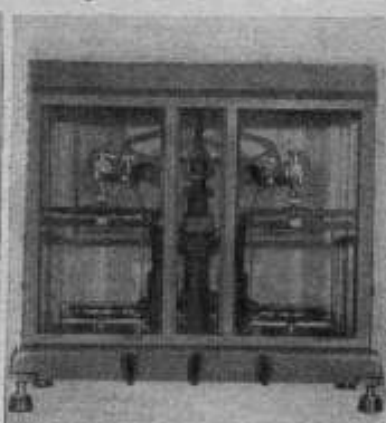


Рис. 4. Образцовые весы 1-го разряда до 5 кг

ние подвесок с чашками осуществляется с помощью манипуляторов. Весы работают по нулевому методу. Разность масс образцовой и поверяемой гири измеряется по углу закручивания нити, измеряемому крутильной головкой.

Шкала лимба крутильной головки проектируется на экран, расположенный на передней стенке корпуса весов. На этот же экран проектируется индекс нулевого положения коромысла. Корпус весов — алюминиевый, основание — металлическое.

Образцовые весы 1-го разряда повышенной точности до 200 г и 1 кг (рис. 2 и 3) и образцовые весы 1-го разряда до 5 и 20 кг (рис. 4 и 5) по своей конструкции относятся к рычажным равноплечим весам. Коромысло в весах до 200 г

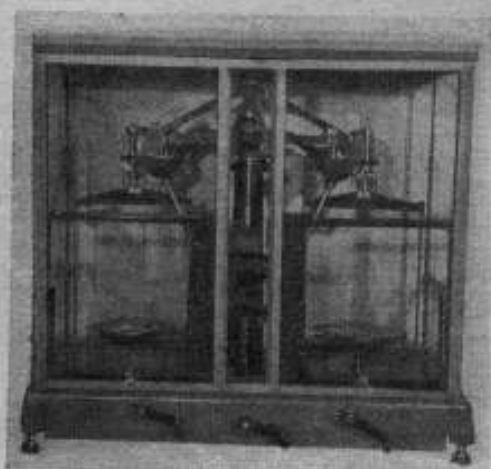


Рис. 5. Образцовые весы 1-го разряда до 20 кг

и 1 кг изготовлено из алюминиевого сплава в виде легкой и жесткой фермы, в весах до 5 и 20 кг — коромысло латунное. Для уменьшения тепловых воздействий коромысло отделено от основного пространства внутри перегородкой. Изолир коромысла вращательного действия, ось вращения рычагов изолира совпадает с лезвием опорной призмы. Подушки во всех

весах — корундовые, а призмы в весах до 200 г, 1 кг и 5 кг — агатовые, до 20 кг — стальные. Витрины и основание весов — металлические, передняя и боковые стенки — стеклянные, с выдвижными дверцами для установки гирь на чашки весов. Шкалы оптические, односторонние, число делений шкалы — 200.

Для облегчения работы оператора весы до 1 кг и более снабжены механизмом гиреналожения, позволяющим лучше совмещать центр тяжести гирь с вертикальной осью подвески, что уменьшает раскачивание чашек при открывании весов.

Государственные испытания во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева образцовых весов показали, что они соответствуют предъявляемым требованиям и могут быть использованы для поверки образцовых и рабочих гирь. Кроме того, их можно использовать для точных измерений массы тел в различных областях науки и техники.

В настоящее время на заводе «Госметр» разрабатываются образцовые весы 1-го разряда повышенной точности на 2 г и 1 кг соответственно с ценой деления 0,002 и 0,1 мг.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Долинский Е. Ф. Выбор оптимальной шкалы измерительного прибора. Сб. «Теплоэнергетические приборы и регуляторы», Машгиз, 1959.
2. Маликов М. Ф. Основы метрологии. Стандартгиз, 1949.
3. Смирнов Н. В., Дунин-Барковский И. В. Краткий курс математической статистики для технических приложений. Физматгиз, 1959.
4. Торопин С. И. Определение оптимальных значений цены деления и вариации показаний весов. «Измерительная техника», 1963, № 7.
5. ГОСТ 14168—69. Весы образцовые. Методы и средства поверки.

Поступила в редакцию 16/IV 1970 г.

УДК [681.261.2 : 633.1] 089.6

И. А. СМЕРНОВА, С. И. ТОРОПИН  
ВНИИМ

### ИССЛЕДОВАНИЕ И АТТЕСТАЦИЯ ГРУППЫ ИСХОДНЫХ ОБРАЗЦОВЫХ ПУРОК 1-ГО РАЗРЯДА ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТИ

При определении отдельных показателей, характеризующих качество зерна при приемке его на государственных заготовительных пунктах, а также при экспорте и импорте зерна измеряют его натуру. В ГОСТ 3040—55 «Зерно продовольственное. Методы определения качества» дано следующее понятие натуре зерна: «Натурой или натуральным весом зерна называют массу одного литра зерна, выраженную в граммах, определяемую на литровой пурке с падающим грузом. Для партии зерна, отпускаемого на экспорт, допускается пользоваться 20-литровой пуркой».

В СССР для зерна, продаваемого государству, установлены районные базисные кондиции по натуре. За каждые 10 г натурального веса пшеницы, ржи, ячменя и овса выше базисных кондиций выплачивается денежная надбавка в размере 0,1% к цене и за каждые 10 г натурального веса ниже нормы установлена скидка, равная 0,1% цены.

Отклонения натурального веса от базисных кондиций менее 5 г во внимание не принимаются, а отклонения 5 г и более принимаются за целые 10 г. Этим условием фактически устанавливается точность определения натуре зерна.

В соответствии с этим допускаемая погрешность показаний литровых рабочих пурок, находящихся в эксплуатации, установлена равной  $\pm 4$  г. Поверка пурок осуществляется в соответствии с поверочной схемой, приведенной на рис. 1.

Накопленная погрешность при поверке рабочих пурок не должна превышать значения, равного  $1/3 (\pm 4 \text{ г}) = \pm 1,3$  г. Исходные образцовые пурки 1-го разряда повышенной точности и методика поверки образцовых и рабочих пурок должны обеспечить эту точность.

Методы поверки литровых пурок регламентированы действующими стандартами ГОСТ 13720—68 «Пурки литровые образцовые. Методы и средства

поверки» и ГОСТ 13719—68 «Пурки литровые рабочие. Методы и средства поверки», разработанными ВНИИМ.

При разработке в 1939 г. поверочной схемы для пурок в качестве эталонной была принята литровая пурка № 2296 со съемной воронкой, изготовленная заводом «Метрон», хотя в это время уже внедрялись пурки с воронкой, снабженной механическим затвором. В связи с этим в 1947 г. встал вопрос о замене эталона пурки. Учитывая, что эталон из одной пурки вследствие ее износа не может быть надежным, было признано целесообразным заменить устаревшую эталонную пурку № 2296 групповым эталоном из трех пурок различной конструкции.

После сличения ряда пурок с эталонной № 2296 были отобраны три: № 11, изготовленная заводом «Эталон», № 5034 и № 19712 фирмы «Шоппер».

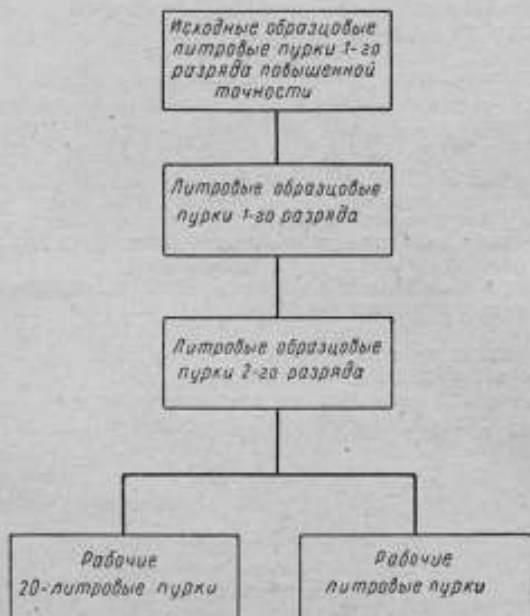


Рис. 1. Поверочная схема пурок

Вместимость мерок для трех пурок подгонялась к вместимости эталонной пурки № 2296 путем сличения их показаний при определении природы зерна с показаниями эталонной пурки № 2296. После этого каждая пурка сличалась с эталонной пуркой № 2296. В каждой серии сличений производилось по 20 измерений природы зерна с каждой пуркой. Ученый совет ВНИИМ, рассмотрев представленные лабораторией измерения массы материалы по созданию группового эталона пурок, утвердил их в качестве исходных образцовых пурок 1-го разряда повышенной точности и разрешил применять их для поверки образцовых пурок 1-го разряда.

В 1956 г. было произведено взаимное круговое сличение группы исходных пурок путем определения всеми пурками природы одного и того же зерна в такой последовательности: два определения природы зерна первой пуркой, два—второй и два—третьей; таким образом было произведено по 10 двойных определений в каждой серии. После этого порядок расположения пурок изменился: первая по порядку пурка перемещалась на последнее место, вторая — занимала место первой, а третья — второй. При таком расположении пурок вновь производились определения природы зерна, но уже новой пор-



ции. Такие сличения, состоящие из трех серий, производились каждым из четырех сотрудников, принимавших участие в круговых сличениях пурок.

По результатам измерений находилось среднее значение из средних значений, полученных для каждой пурки, относительно которого определялись поправки к показаниям пурок.

Принятая в 1956 г. методика сличения исходных образцовых пурок 1-го разряда повышенной точности имела ряд преимуществ: она более отвечала понятию группового эталона, при этом снижалось влияние погрешностей подгонки мерок пурок к одному литру и уменьшались систематические погрешности, обусловленные изменением натуры при многократных ее измерениях.

Опыт эксплуатации исходных образцовых пурок 1-го разряда повышенной точности показал, что взаимные сличения следует производить не реже одного раза в 5 лет.

В период подготовки к очередным круговым сличениям исходных пурок 1-го разряда повышенной точности в 1961 г. было решено изъять пурку № 11 устаревшей конструкции и пурку № 5034, как не обладающую достаточной стабильностью показаний. В новую группу исходных пурок были включены пурки № 19689, № 19707 и № 19712, изготовленные фирмой «Шоппер». В 1961 г. произведено 12 серий взаимных круговых сличений этих пурок, а в 1962 г. было решено дополнить исследование новой группы исходных пурок определением у них действительного объема мерок.

Объемы мерок у пурок определялись двумя методами: путем вычисления объемов по результатам измерения линейных размеров — внутреннего диаметра и глубины мерок — и путем взвешивания дистиллированной воды, заполняющей их объема. При измерении линейных размеров мерки ее высота  $h$  определялась из равенства

$$h = H_1 - H_2 - H_3,$$

где  $H_1$  — расстояние от верхнего края кольца на мерке до верхней плоскости падающего груза;  $H_2$  — расстояние от верхнего края кольца на мерке до верхней плоскости ножа, вставленного в круговую щель мерки;  $H_3$  — расстояние, равное толщине ножа.

Диаметры мерок измерялись в трех горизонтальных сечениях: сверху ( $D_{1в}$ ), в середине ( $D_C$ ) и внизу ( $D_{1н}$ ). В каждом сечении измерение диаметров производилось в двух взаимно перпендикулярных направлениях. За действительное значение диаметра мерки принимался средний результат из шести диаметров, каждый из которых получен как среднее из четырех измерений. В табл. 1 приведены результаты линейных измерений высоты и диаметра каждой мерки и вычисленные по ним объемы.

Таблица 1

| Измеренные величины | Линейные размеры пурок, см |                    |                    |
|---------------------|----------------------------|--------------------|--------------------|
|                     | № 19689                    | № 19707            | № 19712            |
| $D_{1в}$            | 8,830                      | 8,825              | 8,839              |
| $D_{2в}$            | 8,837                      | 8,824              | 8,824              |
| $D_{1с}$            | 8,824                      | 8,819              | 8,820              |
| $D_{2с}$            | 8,823                      | 8,821              | 8,828              |
| $D_{1н}$            | 8,823                      | 8,821              | 8,819              |
| $D_{2н}$            | 8,825                      | 8,820              | 8,826              |
| $D$                 | $8,827 \pm 0,002$          | $8,822 \pm 0,001$  | $8,826 \pm 0,003$  |
| $H_1$               | 20,52                      | 20,55              | 20,48              |
| $H_2$               | 4,03                       | 4,02               | 4,01               |
| $H_3$               | 0,103                      | 0,106              | 0,104              |
| $h$                 | $16,390 \pm 0,014$         | $16,420 \pm 0,014$ | $16,370 \pm 0,014$ |
| $V, \text{ см}^3$   | $1002,99 \pm 0,83$         | $1003,69 \pm 0,83$ | $1001,54 \pm 0,83$ |

Как видно из данных таблицы, диаметры одной и той же мерки оказались различными не только для разных сечений мерки по высоте, но и в одном и том же сечении в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Поэтому несмотря на хорошую внутреннюю сходимость результатов измерения отдельных диаметров объемы мерок, вычисленные по результатам линейных измерений, оказались недостаточно точными. Более точное определение объемов мерок производилось весовым способом — путем взвешивания дистиллированной воды, заполняющей их объемы. При этом зазор между стенкой мерки и падающим грузом до уровня верхней плоскости падающего груза заполнялся специально приготовленной мастикой. Масса воды, заполняющей объем мерки, определялась взвешиванием на одном плече весов Сарториуса с предельной нагрузкой 5 кг и ценой деления 5 мг. В этих опытах мерка с полностью закрытым ножом заполнялась дистиллированной водой до тех пор, пока над ножом не появлялся избыток воды, который срезался ножом при полном закрытии мерки; оставшийся сверху избыток воды удалялся фильтровальной бумагой. Далее определялась масса воды и вычислялся объем мерки

$$V_t = \frac{M \left(1 - \frac{e}{\delta}\right)}{\rho_t - e}$$

где  $M$  — масса гирь, уравновешивающих воду в объеме мерки;  $\delta$  — плотность материала гирь;  $e$  — плотность воздуха;  $\rho_t$  — плотность воды при температуре  $t$ .

Измерение температуры воды производилось ртутным термометром с ценой деления  $0,01^\circ \text{C}$  до и после взвешивания воды на весах. Результаты определения объемов мерок у пурок весовым способом приведены в табл. 2.

Таблица 2

| Объем мерки пурок $V$ , см <sup>3</sup>            |   |  |
|--|---|--|
| № 19689  | № 19707                                   | № 19712                                  |
| 1003,55  | 1003,15                                   | 1001,74                                  |
| 1003,53  | 1003,02                                   | 1001,94                                  |
| 1003,67  | 1003,24                                   | 1001,90                                  |
| 1003,76  | 1003,33                                   | 1002,05                                  |
| 1003,69  | 1003,46                                   | 1001,88                                  |
| 1003,06  | 1003,50                                   | 1001,75                                  |
| 1003,48  | 1003,41                                   | 1001,99                                  |
| Среднее: $1003,54 \pm 0,07$<br>$\sigma = \pm 0,23$ | $1003,30 \pm 0,07$<br>$\delta = \pm 0,18$ | $1001,89 \pm 0,4$<br>$\sigma = \pm 0,12$ |

Аттестация новой группы исходных пурок была произведена с учетом определения действительных объемов мерок весовым способом. Если  $A_i$  есть натура зерна, наблюдаемая по литровой исходной пурке, у которой объем мерки  $V_i \neq 1000$  см<sup>3</sup>, то действительное значение натуре зерна в соответствии с ее определением будет равно

$$A_i^0 = 1000 \frac{A_i}{V_i}$$

Поправка к показаниям пурки

$$\Delta a_j = A_j^0 - A_j = k A_j, \quad (1)$$

где  $k = \frac{1000 - V_j}{V_j}$ .

Поскольку натура зерна (пшеницы)  $A_j$  в зависимости от сорта зерна, его влажности и количества примесей в нем может варьировать от 577 до 877 г, то поправка к показаниям пурки — есть величина переменная, зависящая от измеряемой величины — натуре зерна  $A_j$ . Поправка к показаниям пурки определяется равенством (1). Коэффициент  $k$  в уравнении (1) для исходной пурки может быть определен только по результатам измерения действительного объема мерки  $V_j$ .

Из-за особенностей работы различным пуркам присуща различная плотность заполнения мерок зерном, поэтому приведенные к одному литру значения натуре зерна, наблюдаемые с тремя исходными пурками, будут:

$$\begin{aligned} A_1^0 &= \frac{1000 A_1}{V_1} = 1000 d_1; \\ A_2^0 &= \frac{1000 A_2}{V_2} = 1000 d_2; \\ A_3^0 &= \frac{1000 A_3}{V_3} = 1000 d_3, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $A_1, A_2, A_3$  — наблюдаемые значения натуре зерна;  $d_1 = \frac{A_1}{V_1}$ ;  $d_2 = \frac{A_2}{V_2}$ ;

$d_3 = \frac{A_3}{V_3}$  — плотности заполнения мерок зерном.

Среднеарифметическое этих значений

$$A_m^0 = 1000 \frac{(d_1 + d_2 + d_3)}{3} = 1000 d_c,$$

где  $d_c$  — средняя плотность заполнения пурок зерном.

Поправка к показаниям пурки для приведения наблюдаемой с ней натуре зерна к среднему значению натуре зерна группы исходных пурок

$$\Delta a_j^0 = A_m^0 - A_j. \quad (3)$$

Ввиду различной плотности заполнения мерок зерном поправки к показаниям исходных пурок, вычисленные по формулам (1) и (3), будут различны ( $\Delta a_j \neq \Delta a_j^0$ ). У исходных пурок это может быть учтено путем введения в измеренные объемы мерок поправки

$$\delta V_j = 1000 \frac{A_j}{A_m^0} - V_j, \quad (4)$$

полученной из равенства

$$\left[ \frac{1000 - (V_j + \delta V_j)}{V_j + \delta V_j} \right] A_j = A_m^0 - A_j.$$

Поправка  $\delta V_j$  может быть определена только по результатам взаимных круговых сличений пурок и результатам определения у них объемов мерок, при этом взаимные сличения пурок можно производить с зерном, имеющим любую натуре.

Уравнение (1) после введения поправки на приведение плотности заполнения каждой мерки зерном к средней плотности заполнения мерок исходных пурок, согласно (4), примет вид

$$\Delta a_j = \frac{(A_m^0 - A_j)}{A_j} A, \quad (5)$$

где  $A$  — измеренная пуркой натура зерна;  $A_j$  — среднее значение натуры зерна, измеренное одной из исходных пурок при их взаимном круговом сличении;  $A_m^0$  — среднее арифметическое значение натуры зерна по измерениям всеми исходными пурками.

Средняя квадратическая погрешность ряда измерений при определении натуры зерна образцовой пуркой 1-го разряда повышенной точности была определена по отклонениям наблюдаемых разностей от среднего в 45 сериях, в каждой из которых было произведено 20 определений натуры зерна.

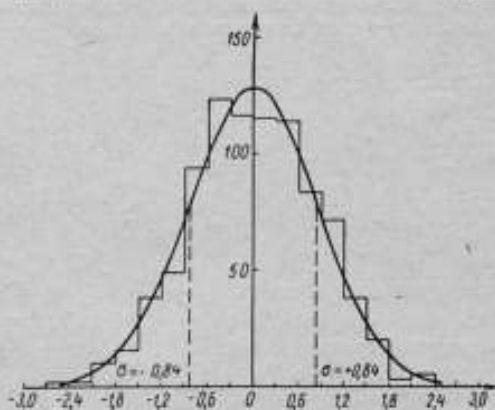


Рис. 2. Диаграмма распределения погрешностей при определении натуры зерна пуркой

На рис. 2 представлена диаграмма распределения 900 остаточных погрешностей, имевших место при круговом сличении трех пурок 1-го разряда повышенной точности и теоретическая кривая нормального распределения этих погрешностей. Как видно, действительное распределение погрешностей хорошо совпадает с теоретическим. Средняя квадратическая погрешность ряда измерений при определении натуры зерна пуркой оказалось равной  $\sigma = \pm 0,84$  г. В соответствии с этим в табл. 3 значения натуры  $A_{\mu}$ , полученные как среднее из 20 повторных

определений, имеют среднюю квадратическую погрешность результата

$$s_{A_j} = \frac{0,19}{\sqrt{20}} = \pm 0,043 \text{ г.}$$

Средняя квадратическая погрешность результата измерений среднего значения наблюдаемой натуры зерна  $\bar{A}_j$  с исходной пуркой из 15 серий измерений

$$s_{\bar{A}_j} = \frac{0,19}{\sqrt{20}} = \pm 0,05 \text{ г.}$$

Как следует из данных табл. 3, круговые сличения исходных пурок подтвердили, что на результат определения натуры зерна пуркой некоторое влияние оказывает ее особенность работы. Средние значения натуры зерна  $\bar{A}_1^0, \bar{A}_2^0, \bar{A}_3^0$ , полученные по измерениям с тремя исходными пурками со средней квадратической погрешностью результата измерений  $\pm 0,05$  г, имеют вариацию показаний 0,55 г, обусловленную различной плотностью заполнения мерок зерном. Оценку средней квадратической погрешности результата при определении натуры зерна с тремя исходными пурками произведем по вариации показаний пурок.

Согласно [1], математическое ожидание

$$M\left(\frac{R_n}{\sigma}\right) = \alpha_n.$$

Таблица 3

| № зерна | Наблюдения натурн зерна, $\epsilon$ |            |          |            | Натура зерна, привешенная к литру, $\epsilon$ |            |          |            | Поправки к показаниям пурок, $\epsilon$ |                                     |                                     |                                     |            |       |            |       |                |
|---------|-------------------------------------|------------|----------|------------|---|------------|----------|------------|---|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|------------|-------|------------|-------|----------------|
|         | № 19712                             |            | № 19707  |            | № 19712                                       |            | № 19707  |            | № 19712                                 |                                     | № 19707                             | № 19689                             |            |       |            |       |                |
|         | $A_{11}$                            | $A_{21}$   | $A_{31}$ | $A_{41}$   | $A_{11}$                                      | $A_{21}$   | $A_{31}$ | $A_{41}$   | $\Delta A_{11} = A_{11} - A_{11}^0$     | $\Delta A_{21} = A_{21} - A_{21}^0$ | $\Delta A_{31} = A_{31} - A_{31}^0$ | $\Delta A_{41} = A_{41} - A_{41}^0$ |            |       |            |       |                |
| 1       | 818,99                              | $\pm 0,17$ | 819,08   | $\pm 0,17$ | 819,91  | $\pm 0,18$ | 817,44   | $\pm 0,18$ | 816,38                                  | 816,95                              | -2,04                               | -0,14                               | -2,13      | +0,49 | -2,96      | -0,30 |                |
| 2       | 820,84                              | $\pm 0,13$ | 821,00   | $\pm 0,10$ | 821,29  | $\pm 0,15$ | 819,29   | $\pm 0,15$ | 818,30                                  | 817,66                              | -2,23                               | -0,33                               | -2,39      | +0,23 | -2,08      | -0,02 |                |
| 3       | 820,79                              | $\pm 0,19$ | 821,60   | $\pm 0,19$ | 821,60  | $\pm 0,19$ | 819,34   | $\pm 0,19$ | 818,90                                  | 818,60                              | 1,88                                | +0,02                               | -2,69      | -0,06 | -2,29      | -0,02 |                |
| 4       | 822,20                              | $\pm 0,17$ | 823,08   | $\pm 0,11$ | 823,38  | $\pm 0,18$ | 820,65   | $\pm 0,18$ | 820,37                                  | 820,13                              | -2,07                               | -0,17                               | -2,56      | -0,33 | -2,13      | +0,53 |                |
| 5       | 821,82                              | $\pm 0,12$ | 823,86   | $\pm 0,09$ | 823,63  | $\pm 0,12$ | 821,27   | $\pm 0,12$ | 821,15                                  | 820,69                              | 1,78                                | +0,12                               | -2,82      | -2,20 | -2,56      | +0,10 |                |
| 6       | 823,22                              | $\pm 0,16$ | 824,04   | $\pm 0,13$ | 823,72  | $\pm 0,16$ | 821,67   | $\pm 0,16$ | 821,33                                  | 820,81                              | 821,27                              | -1,95                               | -0,05      | -2,77 | -2,45      | +0,21 |                |
| 7       | 822,04                              | $\pm 0,15$ | 823,88   | $\pm 0,19$ | 823,91  | $\pm 0,15$ | 820,49   | $\pm 0,15$ | 820,17                                  | 820,01                              | 820,22                              | 1,82                                | +0,08      | -2,66 | -0,04      | -2,69 | -0,03          |
| 8       | 822,64                              | $\pm 0,20$ | 823,44   | $\pm 0,18$ | 823,17  | $\pm 0,19$ | 820,69   | $\pm 0,19$ | 820,73                                  | 820,27                              | 820,76                              | -1,92                               | -0,02      | -2,72 | -0,10      | -2,46 | +0,20          |
| 9       | 822,67                              | $\pm 0,16$ | 823,72   | $\pm 0,20$ | 823,33  | $\pm 0,20$ | 821,19   | $\pm 0,20$ | 821,01                                  | 820,42                              | 820,85                              | -1,82                               | +0,08      | -2,87 | -0,24      | -2,44 | +0,18          |
| 10      | 823,11                              | $\pm 0,21$ | 823,82   | $\pm 0,15$ | 824,00  | $\pm 0,18$ | 821,56   | $\pm 0,18$ | 821,21                                  | 821,09                              | 821,29                              | 1,62                                | +0,08      | -2,63 | -0,01      | -2,71 | -0,05          |
| 11      | 823,94                              | $\pm 0,22$ | 824,94   | $\pm 0,16$ | 825,08  | $\pm 0,21$ | 823,38   | $\pm 0,21$ | 823,23                                  | 822,76                              | 822,26                              | -1,08                               | -0,22      | -2,68 | -0,05      | -2,82 | -0,16          |
| 12      | 824,73                              | $\pm 0,21$ | 825,38   | $\pm 0,18$ | 825,98  | $\pm 0,19$ | 823,17   | $\pm 0,19$ | 822,66                                  | 823,07                              | 822,97                              | -1,76                               | +0,14      | -2,41 | +0,21      | -3,01 | -0,35          |
| 13      | 821,50                              | $\pm 0,16$ | 822,12   | $\pm 0,22$ | 822,73  | $\pm 0,15$ | 819,96   | $\pm 0,15$ | 819,42                                  | 819,73                              | -2,00                               | -0,10                               | -2,50      | +0,05 | -2,66      | 0,00  |                |
| 14      | 820,82                              | $\pm 0,31$ | 821,28   | $\pm 0,31$ | 821,62  | $\pm 0,32$ | 819,27   | $\pm 0,32$ | 818,58                                  | 818,72                              | 818,86                              | -1,96                               | -0,06      | -2,42 | +0,20      | -2,76 | -0,10          |
| 15      | 822,68                              | $\pm 0,24$ | 823,96   | $\pm 0,32$ | 823,27  | $\pm 0,29$ | 820,52   | $\pm 0,29$ | 820,25                                  | 820,36                              | 820,38                              | -1,70                               | +0,22      | -2,58 | +0,04      | -2,89 | -0,23          |
| Среднее | 822,15                              | $\pm 0,05$ | 822,80   | $\pm 0,05$ | 822,95  | $\pm 0,05$ | 820,61   | $\pm 0,05$ | 820,18                                  | 820,05                              | 820,29                              | -1,50                               | $\pm 0,15$ | -2,62 | $\pm 0,05$ | -2,66 | $\pm 0,05$     |
|         |                                     |            |          |            |   |            |          |            |   |                                     |                                     |                                     |            |       |            |       | $0 = \pm 0,23$ |



где  $R_n$  — вариация показаний из  $n$  измерений;  $\alpha_n$  — некоторая функция объема выборки  $n$ .

Для значений  $n < 10$  оценка  $\sigma$  по вариации  $R$  имеет достаточно значительную эффективность. Для  $n = 3$   $\alpha_3 = 1,69$  и средняя квадратическая погрешность ряда измерений природы зерна с одной исходной пуркой будет равна  $\sigma = \frac{0,55}{1,69} = \pm 0,32$ . Поэтому средняя квадратическая погрешность результата  $A_m^0$  при определении природы зерна с тремя исходными пурками  $s_{A_m^0} = \frac{0,32}{\sqrt{3}} = \pm 0,19$ . Согласно (4) средняя квадратическая погрешность результата определения поправки к показанию исходной пурки

$$s_{\Delta a_j^0} = \sqrt{s_{A_m^0}^2 + s_{A_j}^2} = \pm 0,20 \text{ г.} \quad (6)$$

Вычисления коэффициентов в уравнении поправок (5) к показаниям исходных пурок по результатам измерения природы зерна в круговых сличениях приведены в табл. 4.

Таблица 4

| № пурок | $\bar{A}_j$ | $\bar{A}_m^0 - \bar{A}_j$ | $k = \frac{\bar{A}_m^0 - \bar{A}_j}{\bar{A}_j}$ | Уравнение поправки                       |
|---------|-------------|---------------------------|---|--|
| 19689   | 822,96      | -2,68                     | -0,0032565                                      | $\Delta a_{19689} = -0,003256 \text{ г}$ |
| 19707   | 822,89      | -2,61                     | -0,0031717                                      | $\Delta a_{19707} = -0,003172 \text{ г}$ |
| 19712   | 822,16      | -1,88                     | -0,0022866                                      | $\Delta a_{19712} = -0,002287 \text{ г}$ |

Правильность уравнений поправок к показаниям исходных пурок 1-го разряда повышенной точности была проверена экспериментальным путем. В 1963 г. Свердловским филиалом ВНИИМ для очередной поверки была представлена во ВНИИМ образцовая пурка 1-го разряда № 19721. Определение поправки пурки было произведено путем сличения ее с тремя исходными образцовыми пурками 1-го разряда повышенной точности. Результаты определения поправки к показаниям пурки № 19721 приведены в табл. 5.

Таблица 5

| № сличаемой пурки | Число измерений природы зерна | Поправка к показаниям пурки № 19721, г | Отклонение от среднего, г |
|-------------------|-------------------------------|--|---------------------------|
| 19689—19721       | 20                            | -2,36                                  | -0,04                     |
| 19689—19721       | 20                            | -2,23                                  | +0,09                     |
| 19689—19721       | 10                            | -2,22                                  | +0,10                     |
| 19707—19721       | 20                            | -2,37                                  | -0,05                     |
| 19712—19721       | 20                            | -2,31                                  | +0,01                     |
| 19712—19721       | 20                            | -2,44                                  | -0,12                     |

Среднее: -2,32 г       $\sigma = \pm 0,1 \text{ г}$

В ноябре 1965 г. по просьбе специалистов-метрологов ЧССР образцовая пурка ЧССР была сличена с образцовыми пурками 1-го разряда повышенной точности СССР; на образцовую пурку ЧССР была получена поправка —5,9 г. Ранее эта же пурка была сличена с исходными пурками ГДР, в результате чего была получена поправка —6,0 г, т. е. поправки при сличениях во ВНИИМ и в ГДР оказались практически одинаковыми. Это еще раз подтверждает, что образцовые пурки 1-го разряда повышенной точности и методика сличений, принятые в СССР, находятся в удовлетворительном состоянии.

Поправки к показаниям поверяемых образцовых пурок 1- и 2-го разрядов, а также рабочих пурок находятся путем сравнения среднего значения натуре зерна, измеренного с пуркой вышестоящего разряда, с учетом поправки к ее показаниям со средним значением натуре зерна, полученным при измерениях с поверяемой пуркой. В соответствии с этим поправки к показаниям пурок и погрешности результата их определения будут равны:

$$\begin{aligned} \Delta a_1 &= A_n + \Delta a_n - A_1; \quad s_{\Delta a_1} = \sqrt{s_{A_n}^2 + s_{\Delta a_n}^2 + s_{A_1}^2}; \\ \Delta a_2 &= A_1 + \Delta a_1 - A_2; \quad s_{\Delta a_2} = \sqrt{s_{A_1}^2 + s_{\Delta a_1}^2 + s_{A_2}^2}; \\ \Delta a_p &= A_2 + \Delta a_2 - A_p; \quad s_{\Delta a_p} = \sqrt{s_{A_2}^2 + s_{\Delta a_2}^2 + s_{A_p}^2}; \end{aligned} \quad (8)$$

$\Delta a_n, \Delta a_1, \Delta a_2, \Delta a_p$  — поправки к показаниям пурок соответственно исходной пурки 1-го разряда повышенной точности, 1-го разряда, 2-го разряда и рабочей пурки;  $A_n, A_1, A_2, A_p$  — измеренная натура зерна соответственно исходной образцовой пуркой 1-го разряда повышенной точности, 1-го разряда, 2-го разряда и рабочей пуркой;  $s_{\Delta a_n}, s_{\Delta a_1}, s_{\Delta a_2}, s_{\Delta a_p}$  — погрешности определения поправок к показаниям пурок.

Результаты вычисления погрешностей определения поправок к показаниям пурок приведены в табл. 6.

Таблица 6

| Пурка                                      | Число определений натуре зерна | Средняя квадратическая погрешность, г |   |
|--|--------------------------------|---------------------------------------|---|
|  |                                | измерения натуре зерна                | определения поправки к показаниям пурки |
| 1-го разряда повышенной точности . . . . . | 20                             | ±0,19                                 | ±0,20                                   |
| Образцовая 1-го разряда . . . . .          | 20                             | ±0,19                                 | ±0,35                                   |
| »    2-го    »    . . . . .                | 10                             | ±0,26                                 | ±0,58                                   |
| Рабочая . . . . .                          | 6                              | ±0,34                                 | ±0,67                                   |

Накопленная средняя квадратическая погрешность результата при проверке рабочей пурки, равная ±0,67 г, по сравнению с допустимым для нее значением ±1,3 г имеет двойной запас точности.

В результате исследования исходных образцовых пурок 1-го разряда повышенной точности были получены новые значения поправок к их показаниям, которые применяются при текущих проверках пурок. Результаты исследования исходных пурок были использованы при разработке стандартов: ГОСТ 13720—68 «Пурки литровые образцовые. Методы и средства проверки» и ГОСТ 13719—68 «Пурки литровые рабочие. Методы и средства проверки».

Как уже отмечалось, значение поправки к показаниям пурки зависит не только от погрешности ее объема, но и от значения измеряемой природы зерна.

Если при сличении поверяемой пурки с пуркой вышестоящего разряда будет применяться другая натура, чем при поверке пурки вышестоящего разряда, то при определении поправки  $\Delta a$  к показаниям поверяемой пурки будет внесена систематическая ошибка

$$\delta(\Delta a) = \frac{\Delta V}{V} (A_n - A_p),$$

где  $\frac{\Delta V}{V}$  — относительная погрешность объема мерки поверяемой пурки;  $A_n$ ,  $A_p$  — соответственно натура зерна при сличениях поверяемой пурки с пурки вышестоящего разряда.

Если накопленная средняя квадратическая погрешность результата при сличении пурки равна  $\varepsilon$ , то для того чтобы можно было пренебречь систематической погрешностью  $\delta(\Delta a)$ , должно выполняться условие  $\frac{\Delta V}{V} (A_n - A_p) < \frac{\varepsilon}{3}$ .

Для этого необходимо, чтобы при сличениях образцовых пурок применялась пшеница с натурой 720—820 г/л, а допускаемые значения поправок к показаниям образцовых пурок не превышали для образцовых пурок 1-го разряда  $\pm 1,5$  г и  $\pm 2,0$  г — для образцовых пурок 2-го разряда. В соответствии с этим пределы допускаемой погрешности объема мерок для образцовой пурки 1-го разряда могут быть равны  $\pm 1,9$  см<sup>3</sup>, для образцовой пурки 2-го разряда  $\pm 2,2$  см<sup>3</sup>.

При поверке литровых образцовых пурок 1- и 2-го разрядов производится соответственно двадцать и десять повторных измерений природы зерна, а при поверке рабочих пурок — шесть. Допускаемые значения вариации показаний при сличениях пурок не должны превышать:  $R_{20} = \alpha_{20}\sigma = 3,735 \times 0,84 = 3,1$  г при 20 измерениях;  $R_{10} = \alpha_{10}\sigma = 3,078 \times 0,84 = 2,6$  г при 10 измерениях;  $R_6 = \alpha_6\sigma = 2,534 \times 0,84 = 2,1$  г при 6 измерениях.

Средняя квадратическая погрешность ряда измерений на пурочных весах должна удовлетворять условию

$$\sigma_n < \frac{1}{3}\sigma = \frac{1}{3}0,84 = 0,28 \text{ г.}$$

### Выводы

1. Конструкция литровых пурок, исходные меры и методика поверки образцовых и рабочих пурок обеспечивают необходимую точность определения природы зерна при приемке его на заготовительных пунктах, покупке и продаже зерна.

2. Образцовые пурки 1-го разряда повышенной точности, являющиеся исходными для определения природы зерна в СССР, находятся в удовлетворительном состоянии и обеспечивают единообразие измерений не только внутри страны, но и при внешней торговле зерном, так как методы определения природы зерна в СССР принципиально такие же, как в зарубежных странах.

### ЛИТЕРАТУРА

- Смирнов Н. В., Дуинн-Барковский И. В. Краткий курс математической статистики для технических приложений. Физматгиз, 1959.

Поступила в редакцию 14/IV 1970 г.

ВЛИЯНИЕ ВНУТРЕННИХ «ГАРМОНИЧЕСКИХ» ПОМЕХ  
НА РЫЧАЖНЫЕ ВЕСЫ

При открывании изолирующего механизма весов вследствие нецентрального расположения груза на чашке подвеска неизбежно получает толчок, под действием которого она совершает практически незатухающие, небольшие по амплитуде гармонические колебания, затрудняющие отсчет положения равновесия коромысла. Особенно неблагоприятно влияние раскачивания подвесок в весах с автоматическим уравниванием, где частота свободных колебаний коромысла за счет охвата его обратной связью увеличивается и приближается к частоте свободных колебаний подвесок.

В работе [1] рассмотрен случай свободных колебаний рычажных весов без успокоителей с учетом непоступательного движения подвесок. Колебания такой системы описываются системой трех дифференциальных уравнений второго порядка. Анализ этих уравнений показывает, что характер колебаний коромысла не искажается, если «просвет» между опорной и грузоприемными призмами равен нулю. При этом предполагается, что подвески до начала движения коромысла находились в состоянии покоя, а влиянием центробежных сил качающихся подвесок можно пренебречь, как величиной второго порядка малости.

Между тем для практики интерес представляет случай, когда свободные колебания коромысла погашены успокоителем или схемой автоматического уравнивания и имеют место только вынужденные колебания под действием качающихся подвесок.

Как будет показано ниже, при таком режиме работы весов пренебрегать величинами второго порядка малости уже нельзя, особенно в весах с автоматическим уравниванием.

Для вывода уравнения динамики весов воспользуемся уравнением Лагранжа

$$\frac{d}{dt} \left[ \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right] - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial \Pi}{\partial q_i} = Q_i, \quad (1)$$

где  $T$ ,  $\Pi$  — кинематическая и потенциальная энергия системы;  $Q_i$  — обобщенная сила;  $q_i$ ,  $\dot{q}_i$  — обобщенная координата и скорость.

Чтобы упростить выкладки, введем ряд ограничений:

а) подвижная система (коромысло и подвески) является строго симметричной;

б) левая подвеска находится в режиме незатухающих колебаний, правая подвеска неподвижна;

в) углы отклонения коромысла и подвески малы, так что можно положить  $\sin \varphi = \varphi$ ,  $\cos \varphi = 1$ ;

г) масса подвески сосредоточена на ее конце.

На схеме призматических равноплечих весов (рис. 1) приняты следующие обозначения:

$P_K$  — вес коромысла;

$P_n$  — вес правой и левой подвески;

$a$  — длина плеча коромысла;

$c$  — расстояние от центра тяжести коромысла до оси его вращения;

$c_1$  — «просвет»;

$\varphi$  — угол отклонения коромысла от горизонтальной плоскости;

$\varphi_n$  — текущее значение угла отклонения подвески от вертикали;

$l_n$  — длина подвески;

$v_A(0)$  — скорость оси  $A$  качания подвески относительно оси  $O$  вращения коромысла;

$v_{B(A)}$  — скорость конца  $B$  подвески относительно оси  $A$  качания подвески;

$v_{B(O)}$  — скорость конца  $B$  подвески относительно оси  $O$  качания коромысла.

По теореме косинусов

$$v_{B(O)} = \sqrt{v_{A(O)}^2 + v_{B(A)}^2 - 2v_{A(O)}v_{B(A)}\cos\alpha}. \quad (2)$$

Из рассмотрения рис. 1 следует:

$$\alpha = \frac{\pi}{2} + \gamma_1 + \gamma_2;$$

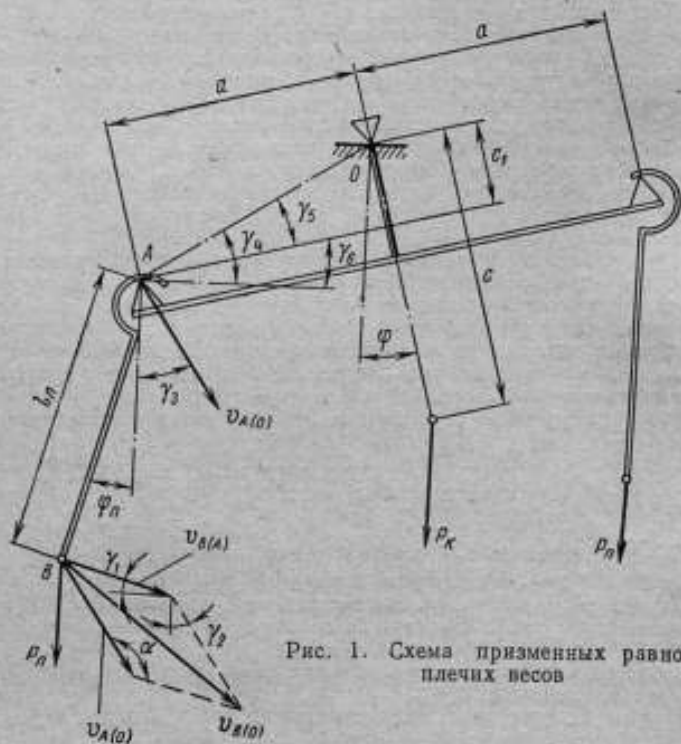


Рис. 1. Схема призмных равноплечих весов

$$\gamma_1 = \varphi_n;$$

$$\gamma_2 = \gamma_3 = \gamma_4 = \gamma_5 + \gamma_6;$$

$$\gamma_5 = \frac{c_1}{a};$$

$$\gamma_6 = \varphi;$$

отсюда

$$\alpha = \frac{\pi}{2} + \varphi_n + \frac{c_1}{a} + \varphi; \quad (3)$$



$$v_{A(0)} = \dot{\varphi} \sqrt{a^2 + c_1^2} \approx \dot{\varphi} a, \quad (4)$$

так как  $a \gg c_1$ ;

$$v_{B(A)} = \dot{\varphi}_n l_n. \quad (5)$$

Решая совместно выражения (2)–(5), получим

$$v_{B(0)} = \sqrt{(\dot{\varphi} a)^2 + (\dot{\varphi}_n l_n)^2 + 2a l_n \dot{\varphi} \dot{\varphi}_n \sin\left(\varphi_n + \frac{c_1}{a} + \varphi\right)}. \quad (6)$$

Кинетическая энергия подвижной системы

$$T = T_K + T_{n_1} + T_{n_2}.$$

Кинетическая энергия коромысла

$$T_K = \frac{J_K}{2} \dot{\varphi}^2,$$

где  $J_K$  — момент инерции коромысла.

Кинетическая энергия левой подвески

$$T_{n_1} = \frac{P_n v_{B(0)}^2}{2g} = \frac{P_n}{2g} \left[ (\dot{\varphi} a)^2 + (\dot{\varphi}_n l_n)^2 + 2a l_n \dot{\varphi} \dot{\varphi}_n \sin\left(\varphi_n + \frac{c_1}{a} + \varphi\right) \right],$$

где  $g$  — ускорение свободного падения.

Кинетическая энергия правой подвески

$$T_{n_2} = \frac{P_n}{2g} (\dot{\varphi} a)^2.$$

Из последних уравнений

$$T = \frac{J_K}{2} \dot{\varphi}^2 + \frac{P_n}{2g} (\dot{\varphi} a)^2 + \frac{P_n}{2g} \left[ (\dot{\varphi} a)^2 + (\dot{\varphi}_n l_n)^2 + 2a l_n \dot{\varphi} \dot{\varphi}_n \sin \times \right. \\ \left. \times \left( \varphi_n + \frac{c_1}{a} + \varphi \right) \right]. \quad (7)$$

Характер колебаний подвески практически не зависит от угла наклона коромысла, что дает возможность в качестве обобщенной координаты принять угол  $\varphi$  отклонения коромысла, поэтому

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} = J_K \dot{\varphi} + \frac{2P_n}{g} a^2 \dot{\varphi} + \frac{P_n}{g} a l_n \sin\left(\varphi + \frac{c_1}{a} + \varphi_n\right) \dot{\varphi}_n;$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} \right) = J_K \ddot{\varphi} + \frac{2P_n}{g} a^2 \ddot{\varphi} + \frac{P_n}{g} a l_n \sin\left(\varphi + \frac{c_1}{a} + \varphi_n\right) \ddot{\varphi}_n + \\ + \frac{P_n}{g} a l_n \cos\left(\varphi + \frac{c_1}{a} + \varphi_n\right) \dot{\varphi}_n^2. \quad (8)$$

Левая подвеска совершает колебания по закону

$$\varphi_n = \varphi_{n0} \sin \omega_n t, \quad (9)$$

где  $\varphi_{n0}$  — начальный угол отклонения подвески;  $\omega_n$  — круговая частота свободных колебаний подвески.

С учетом (9) преобразуем уравнение (8) следующим образом:

$$\begin{aligned}\ddot{\varphi}_n &= -\varphi_{n_0} \omega_n^2 \sin \omega_n t; \\ \dot{\varphi}_n^2 &= \varphi_{n_0}^2 \omega_n^2 \cos^2 \omega_n t; \\ \sin\left(\varphi + \frac{c_1}{a} + \varphi_n\right) &= \sin\left(\varphi + \frac{c_1}{a} + \varphi_{n_0} \sin \omega_n t\right) = \\ &= \sin\left(\varphi + \frac{c_1}{a}\right) \cos(\varphi_{n_0} \sin \omega_n t) + \cos\left(\varphi + \frac{c_1}{a}\right) \sin(\varphi_{n_0} \sin \omega_n t); \\ \sin\left(\varphi + \frac{c_1}{a}\right) &\approx \varphi + \frac{c_1}{a}; \\ \cos\left(\varphi + \frac{c_1}{a}\right) &\approx 1.\end{aligned}$$

Разлагая тригонометрические функции в степенной ряд, имеем:

$$\begin{aligned}\cos(\varphi_{n_0} \sin \omega_n t) &\approx 1 - \frac{1}{2} \varphi_{n_0}^2 \sin^2 \omega_n t; \\ \sin(\varphi_{n_0} \sin \omega_n t) &\approx \varphi_{n_0} \sin \omega_n t; \\ \sin\left(\varphi + \frac{c_1}{a} + \varphi_n\right) &= \varphi + \frac{c_1}{a} - \frac{1}{2} \left(\varphi + \frac{c_1}{a}\right) \varphi_{n_0}^2 \sin^2 \omega_n t + \varphi_{n_0} \sin \omega_n t.\end{aligned}$$

Аналогично

$$\cos\left(\varphi + \frac{c_1}{a} + \varphi_n\right) = 1 - \frac{1}{2} \varphi_{n_0}^2 \sin^2 \omega_n t - \left(\varphi + \frac{c_1}{a}\right) \varphi_{n_0} \sin \omega_n t.$$

Подставляя полученные выше выражения в уравнение (8) и отбрасывая слагаемые с сомножителями  $\varphi_{n_0}^3$  и  $\varphi_{n_0}^4$ , окончательно будем иметь

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt} \left[ \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} \right] &= \left( J_k + \frac{2P_n}{g} \dot{z} a^2 \right) \ddot{\varphi} + \frac{P_n}{g} a l_n \left[ \varphi_{n_0}^2 \omega_n^2 \cos^2 \omega_n t - \varphi_{n_0}^2 \omega_n^2 \sin^2 \omega_n t - \right. \\ &\quad \left. - \left( \varphi + \frac{c_1}{a} \right) \varphi_{n_0} \omega_n^2 \sin \omega_n t \right]. \quad (10)\end{aligned}$$

Таким же образом из (7) и (9) получаем

$$\frac{\partial T}{\partial \varphi} = \frac{P_n}{g} a l_n \varphi_{n_0} \omega_n \cos \omega_n t \dot{\varphi}. \quad (11)$$

Потенциальная энергия подвижной системы

$$\begin{aligned}\Pi &= P_k (H - c \cos \varphi) + P_n (H - c_1 \cos \varphi + a \sin \varphi - l_n) + \\ &\quad + P_n (H - c_1 \cos \varphi - a \sin \varphi - l_n \cos \varphi_n); \\ \frac{\partial \Pi}{\partial \varphi} &\approx (P_k c + 2P_n c_1) \varphi.\end{aligned}$$

Обозначим

$$P_k c + 2P_n c_1 = M_{np},$$

где  $M_{np}$  — удельный квазиупругий противодействующий момент коромысла.

Тогда

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \varphi} = M_{np} \varphi. \quad (12)$$

Обобщенная сила без учета сил сухого и вязкого трения в парах призма—подушка

$$Q_t = -M_y \dot{\varphi}, \quad (13)$$

где  $M_y$  — удельный момент успокоения коромысла за счет воздушного успокоителя.

После подстановки уравнений (10)—(13) в исходную формулу (1) получим интересующее нас уравнение

$$\begin{aligned} \left( J_k + \frac{2P_n}{g} a^2 \right) \ddot{\varphi} + \left( M_y - \frac{P_n a}{\omega_n} \varphi_{n_0} \cos \omega_n t \right) \dot{\varphi} + M_{np} \varphi = \\ = \frac{P_n}{g} a l_n \left[ \varphi_{n_0}^2 \omega_n^2 \sin^2 \omega_n t - \varphi_{n_0}^2 \omega_n^2 \cos^2 \omega_n t + \left( \varphi + \frac{c_1}{a} \right) \varphi_{n_0} \omega_n^2 \sin \omega_n t \right], \end{aligned}$$

которое при  $M_y \gg \frac{P_n a}{\omega_n} \varphi_{n_0} \cos \omega_n t$  приводится к виду:

$$\begin{aligned} J_{np} \ddot{\varphi} + M_y \dot{\varphi} + M_{np} \varphi = \frac{P_n}{g} a l_n \left[ \varphi_{n_0}^2 \omega_n^2 \sin^2 \omega_n t - \varphi_{n_0}^2 \omega_n^2 \cos^2 \omega_n t + \right. \\ \left. + \left( \varphi + \frac{c_1}{a} \right) \varphi_{n_0} \omega_n^2 \sin \omega_n t \right], \end{aligned}$$

где  $J_{np}$  — приведенный момент инерции подвижной системы.

Согласно принятому выше ограничению подвеска представляет собой математический маятник, для которого круговая частота свободных колеба-

$$\omega_n = \sqrt{\frac{g}{l_n}}.$$

С учетом этого

$$\begin{aligned} J_{np} \ddot{\varphi} + M_y \dot{\varphi} + M_{np} \varphi = a P_n \left[ \varphi_{n_0}^2 \sin^2 \omega_n t - \varphi_{n_0}^2 \cos^2 \omega_n t + \right. \\ \left. + \left( \varphi + \frac{c_1}{a} \right) \varphi_{n_0} \sin \omega_n t \right]. \quad (14) \end{aligned}$$

Выражение, стоящее в левой части уравнения (14), характеризует систему как колебательное звено с передаточной функцией

$$W_k(p) = \frac{K_k}{T_k^2 p^2 + 2\xi T_k p + 1}, \quad (15)$$

где  $T_k = \sqrt{\frac{J_{np}}{M_{np}}}$  — постоянная времени коромысла;  $\xi = \frac{M_y}{2 \sqrt{J_{np} M_{np}}}$  —

степень успокоения коромысла;  $K_k = \frac{a}{M_{np}}$  — статический коэффициент преобразования (чувствительность) коромысла;  $p$  — оператор Лапласа.

Правая часть уравнения (14) представляет момент гармонического воздействия силы качающейся подвески.

$$F_{\sim} = P_n \left[ \varphi_{n_0}^2 \sin^2 \omega_n t - \varphi_{n_0}^2 \cos^2 \omega_n t + \left( \varphi + \frac{c_1}{a} \right) \varphi_{n_0} \sin \omega_n t \right]. \quad (16)$$

Поясним физический смысл каждого слагаемого правой части уравнения (16), которое представим в таком виде:

$$F_{\sim} = F'_{\sim} + F''_{\sim} + F'''_{\sim}$$

Для этого рассмотрим произвольное положение подвижной системы, когда коромысло находится в положении равновесия под углом  $\varphi$  к горизонту, а подвеска совершает периодические колебания вокруг точки  $A$  (рис. 2) и в данный момент времени находится под углом  $\varphi_{n0}$  к вертикали. Разложим силу  $P_n$  на две составляющие  $F_3$  и  $F_2$ . Сила  $F_2$  стремится повернуть подвеску в вертикальное положение. Силу  $F_1$  разложим на составляющие  $F_3$  и  $F_4$ . Эти составляющие при колебаниях подвески будут изменяться, создавая гармоническое воздействие на точку  $A$ ,

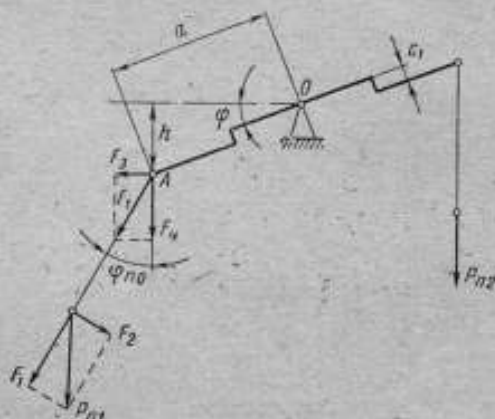


Рис. 2. Диаграмма сил, действующих на коромысло при раскачивании подвески

$$F'_{\sim} = P_{n2} - F_4;$$

$$F_4 = P_{n1} \cos^2 \varphi_{n0}$$

С учетом уравнения (9)

$$F_4 = P_{n1} \cos^2 (\varphi_{n0} \sin \omega_n t)$$

Разлагая функцию  $\cos^2 x$  в степенной ряд и ограничиваясь двумя первыми членами ряда, получим

$$F_4 = P_{n1} (1 - \varphi_{n0}^2 \sin^2 \omega_n t)$$

откуда при  $P_{n1} = P_{n2}$  будем иметь:

$$F'_{\sim} = P_n \varphi_{n0} \sin^2 \omega_n t;$$

$$F''_{\sim} = \frac{F_3 h}{a}; \quad (17)$$

$$h = a\varphi + c_1;$$

$$F_3 = P_n \cos \varphi_{n0} \sin \varphi_{n0} = P_n \left( \varphi_{n0} \sin \omega_n t - \frac{1}{2} \varphi_{n0}^3 \sin^3 \omega_n t \right)$$

Пренебрегая последним слагаемым правой части уравнения, получаем

$$F_3 = P_n \varphi_{n0} \sin \omega_n t,$$

откуда

$$F''_{\sim} = P_n \left( \varphi + \frac{c_1}{a} \right) \varphi_{n0} \sin \omega_n t. \quad (18)$$

Последнее из слагаемых уравнения (16)

$$F'''_{\sim} = P_n \varphi_{n0}^2 \cos^2 \omega_n t$$

является центробежной силой  $F_{цб}$ .

В самом деле

$$F_{цб} = - \frac{P_n v^2}{g l_n},$$

где  $v$  — скорость движения конца подвески

$$v = l_n \dot{\varphi}_{n0} = \varphi_{n0} l_n \omega_n \cos \omega_n t = \sqrt{g l_n} \varphi_{n0} \cos \omega_n t;$$

$$F_{цб} = F'''_{\sim} = - P_n \varphi_{n0}^2 \cos^2 \omega_n t.$$

Теперь, когда вскрыт физический смысл всех слагаемых, уравнение (16) можно упростить

$$F_{\sim} = P_n \left[ \left( \varphi + \frac{c_1}{a} \right) \varphi_{n_0} \sin \omega_n t - \varphi_{n_0}^2 \cos 2\omega_n t \right]. \quad (19)$$

Уравнение (19) показывает, что гармоническое воздействие на коромысло имеет две составляющие, одна из которых изменяется с частотой колебаний подвески, а вторая — с двойной частотой колебаний подвески. Под действием гармонических возмущений коромысло будет находиться в режиме вынужденных колебаний, амплитуда которых [2] с учетом (19) равна

$$F_{\text{вых}} = P_n \varphi_{n_0} \left( \varphi + \frac{c_1}{a} \right) A \times \\ \times \left( \frac{\omega_n}{\omega_0} \right) \sin(\omega_n t + \psi_1) - \\ - P_n \varphi_{n_0}^2 A \left( \frac{2\omega_n}{\omega_0} \right) \cos(2\omega_n t + \\ + 2\psi_2). \quad (20)$$

где  $\psi_1, \psi_2$  — сдвиг фаз выходного сигнала по отношению к входному;  $A(\omega)$  — амплитудно-частотная характеристика коромысла;  $\omega_0 = \sqrt{\frac{M_{np}}{J_{np}}}$  — круговая частота свободных колебаний коромысла.

На рис. 3, а представлена картина вынужденных колебаний коромысла, построенная по уравнению (20) для произвольно выбранного соотношения амплитуд составляющих двойной и основной частоты колебаний подвески при  $\psi_1 = \psi_2 + \frac{\pi}{8}$ . Здесь же приведена экспериментальная кривая (рис. 3, б), качественно подтверждающая справедливость уравнения (20).

При нахождении коромысла в горизонтальном положении установкой нулевого «просвета» влияние первого члена уравнения (20) можно практически свести к нулю. Этот вывод совпадает с выводами работы [1] и иллюстрируется экспериментальными кривыми на рис. 4. Как видно, при уменьшении «просвета» влияние гармонической составляющей основной частоты колебаний подвески уменьшается и при  $c_1 = 0$  коромысло находится в режиме вынужденных колебаний с двойной частотой качания подвески. Амплитуда этих колебаний определяется частотными характеристиками подвижной системы и не зависит от правильности установки приам. Поэтому далее будем рассматривать только влияние силы

$$F_{\sim} = P_n \varphi_{n_0}^2 \cos 2\omega_n t,$$

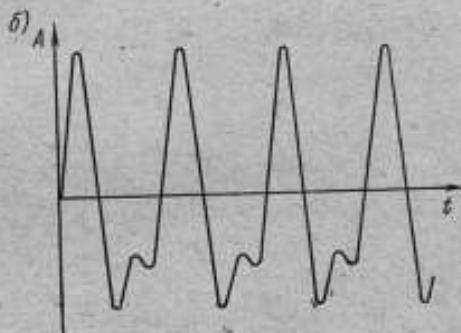
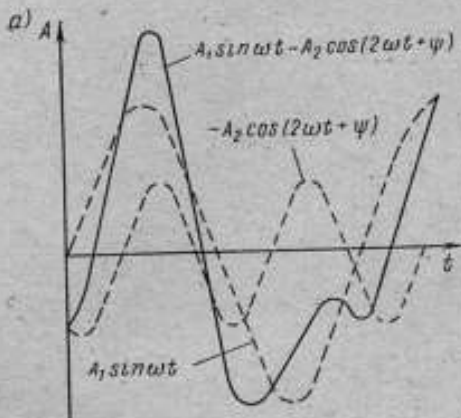


Рис. 3. Вид гармонического воздействия качающейся подвески



действие которой равносильно изменению массы

$$m_{\sim} = \frac{P_{\text{п}}}{g} \varphi_{\text{п}}^2 \cos 2\omega_{\text{п}} t.$$

Под действием гармонического воздействия на входе коромысло будет совершать колебания с двойной частотой колебания подвески и амплитудой  $\varphi_{\sim}$ , определяемой соотношением

$$\varphi_{\sim} = m_{\sim} A \left( \frac{2\omega_{\text{п}}}{\omega_0} \right).$$

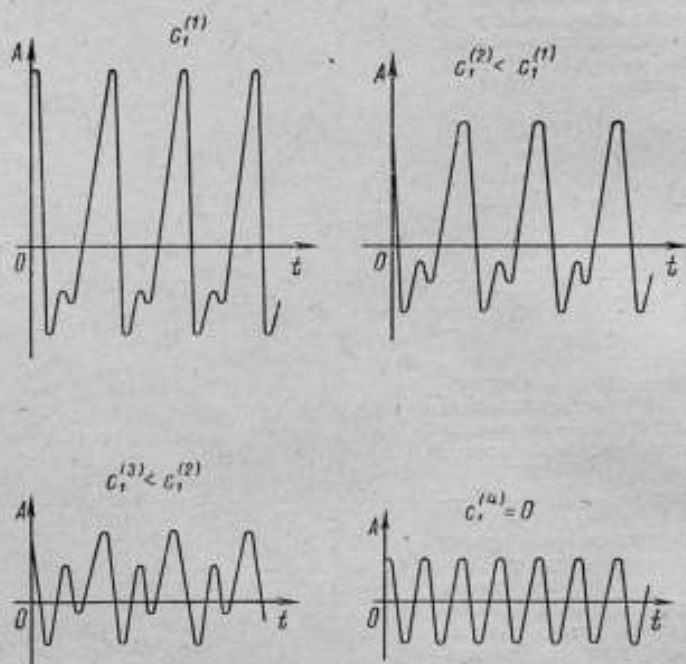


Рис. 4. Изменение характера возмущающего воздействия подвески при изменении «просвета»

Амплитудно-частотная характеристика весов легко выводится из их передаточной функции (15) заменой  $p$  на  $j\omega$ :

$$W(j\omega) = \left[ \frac{1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}}{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + \left(2\xi \frac{\omega}{\omega_0}\right)^2} - j \frac{2\xi \frac{\omega}{\omega_0}}{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + \left(2\xi \frac{\omega}{\omega_0}\right)^2} \right] K_{\kappa} =$$

$$= K_{\kappa} [P(\omega) + jQ(\omega)];$$

$$A(\omega) = K_{\kappa} \sqrt{[P(\omega)]^2 + [Q(\omega)]^2} = \frac{K_{\kappa}}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + \left(2\xi \frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}}. \quad (21)$$

Амплитуда колебаний коромысла

$$\varphi_{\sim} = m_{\sim} K_{\kappa} \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{2\omega_{\text{п}}}{\omega_0}\right)^2\right]^2 + \left(2\xi \frac{2\omega_{\text{п}}}{\omega_0}\right)^2}}$$

Абсолютная погрешность весов от колебаний подвесок

$$\Delta m_{\sim} = \frac{\varphi_{\sim}}{K_{\kappa}} = \frac{m_{\sim}}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{2\omega_{\text{п}}}{\omega_0}\right)^2\right]^2 + \left(2\xi \frac{2\omega_{\text{п}}}{\omega_0}\right)^2}} \quad (22)$$

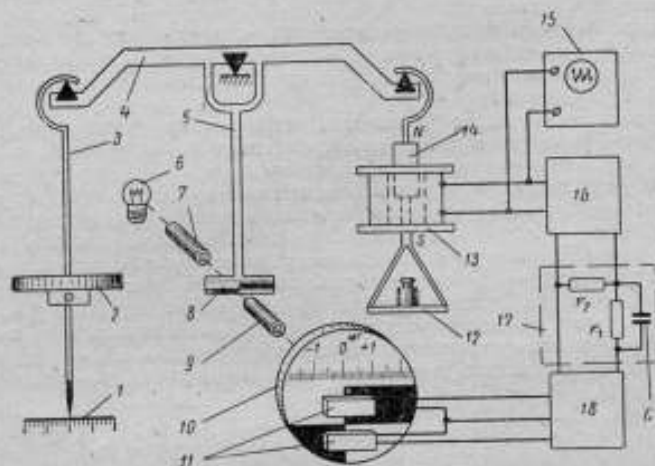


Рис. 5. Схема установки для исследования влияния раскачивания подвески

Для снижения влияния раскачивания подвески необходимо, чтобы круговая частота колебаний подвесок  $\omega_{\text{п}}$  была больше круговой частоты колебаний коромысла  $\omega_0$ . При  $\frac{2\omega_{\text{п}}}{\omega_0} > 3$

$$\Delta m_{\sim} \approx \frac{m_{\sim}}{\left(\frac{2\omega_{\text{п}}}{\omega_0}\right)^2} = \frac{P_{\text{п}} \varphi_{\text{п}}^2 \cos 2\omega_{\text{п}} t}{g \left(\frac{2\varphi_{\text{п}}}{\omega_0}\right)^2} \quad (23)$$

В равноплечих призменных весах условие  $2\omega_{\text{п}} > \omega_0$  обычно выполняется. Так, на весах типа ВЛА-200  $\omega_0 = 0,3 - 0,5 \text{ сек}^{-1}$ ,  $2\omega_{\text{п}} = 12,5 \text{ сек}^{-1}$ . Влияние раскачивания подвесок в этих весах снижается в 700—2000 раз за счет большой инерционности коромысла.

Прежде чем рассматривать влияние раскачивания подвески на весы с автоматическим уравновешиванием, приведем описание экспериментальной установки, схема которой показана на рис. 5.

Левая подвеска весов 3 представляет собой длинный стержень, по которому перемещается шайба 2. Конец стержня оформлен в виде стрелки, против которой установлена неподвижная шкала 1, позволяющая измерять амплитуду колебаний конца подвески. На центральной стрелке — указателе 5 отклонений коромысла 4 укреплен стеклянная пластина 6 с нане

сенной на все фотоспособом непрозрачной ступенчатой микромаской и микрошкалой [3]. Изображение микрошкалы и микромаски с помощью оптической системы (осветитель 6, конденсор 7 и объектив 9) проектируется на матовый экран 10. На экране укреплен оправка с двумя фоторезисторами 11 так, что она не закрывает деления шкалы для визуального отсчета угла отклонения коромысла. При этом изображения темных полос микромаски при колебаниях коромысла перемещаются вдоль фоточувствительного слоя фоторезисторов. Фоторезисторы подключены по входу усилителя напряжения 18, после которого включен дифференцирующий контур 17, состоящий из конденсатора  $C$  и резисторов  $r_1$  и  $r_2$ .

Выход дифференцирующего контура соединен со входом усилителя мощности 16, нагруженного катушкой 13 магнитоэлектрического обращенного преобразователя. Постоянный магнит 14 обращенного преобразователя укреплен на второй подвеске 12.

Система автоматического уравнивания работает следующим образом. При открывании изолирующего механизма коромысло получает начальное рассогласование, которое воспринимается фотоэлектрическим преобразователем перемещений.

Рассогласование через усилитель, дифференцирующий контур и обращенный преобразователь преобразуется в силовое воздействие, которое направлено в сторону устранения рассогласования.

Через небольшой промежуток времени коромысло благодаря схеме автоматического уравнивания переходит в состояние равновесия. Если подвеске легким толчком сообщить колебания, то на коромысле будут действовать гармонические силы, с изменением которых будет изменяться и выходной ток системы. На экране осциллографа 15 будет записываться кривая этих колебаний. Изменяя положение шайбы 2 на стержне, т. е. изменяя частоту свободных колебаний подвески, можно снять зависимость амплитуды колебаний коромысла от частоты колебаний подвески.

Амплитудно-частотная характеристика коромысла, охваченного обратной связью [4], будет

$$A(y) = \sqrt{[P(y)]^2 + [Q(y)]^2}, \quad (24)$$

где

$$P(y) = \frac{1 - y^2 + \sqrt{\frac{M}{M+1}} y \left[ \sqrt{\frac{M}{M-1}} y - \frac{\sqrt{M(M-1)}}{M+1} y^3 \right]}{(1 - y^2)^2 + \left[ \sqrt{\frac{M}{M+1}} y - \frac{\sqrt{M(M-1)}}{M+1} y^3 \right]^2};$$

$$Q(y) = \frac{\left[ \frac{\sqrt{M(M-1)}}{M+1} - \sqrt{\frac{M}{M-1}} \right] y^3}{(1 - y^2)^2 + \left[ \sqrt{\frac{M}{M+1}} y - \frac{\sqrt{M(M-1)}}{M+1} y^3 \right]^2};$$

$y = \frac{\omega}{\omega_0}$  — относительная частота;  $\omega_0^* = \sqrt{\frac{M_{пр} + M_2}{J_{пр}}}$  — круговая частота свободных колебаний коромысла, охваченного обратной связью;  $M_2$  — электрический квазиупругий противодействующий момент за счет обратной связи;  $M$  — показатель колебательности замкнутой системы.

Значение показателя колебательности связано с параметрами дифференцирующего контура (рис. 5) следующими уравнениями [4]:

$$r_1 = r_2 \frac{2\sqrt{M}}{M-1}; \quad C = \frac{\sqrt{M-1}}{2\omega_0^* r_2}.$$

Рассчитанное по уравнению (24) семейство амплитудных частотных характеристик замкнутой системы для значений показателя колебательности  $M = 1,1+1,9$  представлено на рис. 6.

Частота колебаний подвески редко превышает 1 гц и гармоническое воздействие качающейся подвески полностью или даже усиленное резонансным эффектом передается на выход системы. Практически погрешность весов с автоматическим уравниванием, определяемая формулой

$$\Delta m_{\sim} = m_{\sim} A \left( \frac{2\omega_n}{\omega_0} \right)$$

где  $A \left( \frac{2\omega_n}{\omega_0} \right)$  находится по графику рис. 6, лежит в пределах

$$\Delta m_{\sim} = (1 + 2) \frac{P_n}{g} \varphi_{n_0}^2 \cos 2\omega_n t \quad (25)$$

в зависимости от отношения  $\frac{2\omega_n}{\omega_0}$  и показателя колебательности  $M$  системы.

Уменьшение периода свободных колебаний коромысла, охваченного обратной связью и связанное с этим резкое уменьшение времени установления показаний, приводит к столь же резкому повышению влияния раскачивания подвесок, что наглядно видно из сравнения выражений (23) и (25).

Опыт эксплуатации весов с автоматическим уравниванием показывает, что влияние раскачивания подвесок является самым серьезным и трудноустраняемым препятствием повышению чувствительности. Так, в весах типа ВЛА-200 со схемой автоматического уравнивания, которая при цене деления 0,1 мг/дел обеспечивает время установления показаний порядка 2-3 сек при начальном отклонении чашки от положения равновесия на 0,3 мм (угол отклонения подвески  $\varphi_{n_0} = 10^{-3}$  рад), погрешность  $\Delta m_{\sim}$  составляет 0,2 — 0,3 мг. Указатель выходного прибора, если последний имеет достаточное быстродействие, может колебаться в пределах двух, трех делений. В тех же весах без обратной связи  $\Delta m_{\sim}$  не превышает 0,0002 мг или 0,002 дел.

Проведенные исследования подтверждают правильность полученных уравнений как в качественном, так и в количественном отношении.

На основании изложенного можно сделать ряд выводов и практических рекомендаций, которые следует учитывать при конструировании и настройке весов:

- 1) частота свободных колебаний подвесок должна быть значительно меньше частоты свободных колебаний коромысла;
- 2) коромысло в нулевом положении следует устанавливать по горизонту, «просвет» между опорной и грузоприемными призмами должен быть равен нулю.

При высокой чувствительности весов с автоматическим уравниванием может быть применен любой из способов подавления гармонических

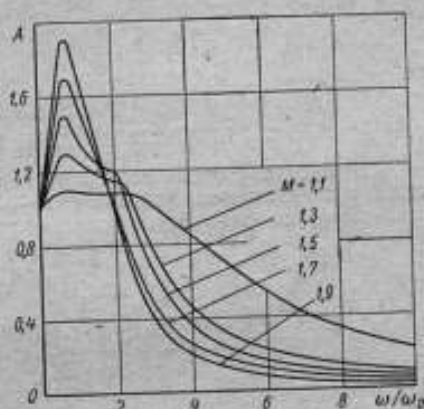


Рис. 6. Нормированные амплитудно-частотные характеристики весов с автоматическим уравниванием

помех, а именно: введение успокоителей колебаний подвесок; синхронизация колебания подвесок (для трехпризменного равноплечего коромысла с двумя подвесками); установка инерционного выходного прибора и частотного фильтра, не пропускающего сигнал с двойной частотой колебаний подвески на выходной прибор.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Felgentraeger W. Feine Waagen, Wägungen und Gewichte. Berlin, Verlag von Julius Springer, 1932.

2. Приборостроение и средства автоматки. Под ред. А. Н. Гаврилова. Кн. 1, т. 2, «Машиностроение», 1964.

3. Феокистов В. Г., Вейгман Г. В. Приставка к лабораторным аналитическим весам для регистрации приращений массы. «Приборы и средства автоматизации», 1967, № 3.

4. Феокистов В. Г. Разработка, теоретические и экспериментальные исследования весов с автоматическим уравниванием. Автореф. дисс., ВНИИМ, 1969.

Поступила в редакцию 18/IV 1970 г.

УДК 681.261.2.082.13

В. Г. ФЕОКИСТОВ  
ВНИИМ

### ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЕСОВ С АВТОМАТИЧЕСКИМ УРАВНОВЕШИВАНИЕМ

Структурная схема весов с автоматическим уравниванием (рис. 1) включает чувствительный элемент — коромысло  $K$ , преобразующий расхождение по силе  $\Delta F$  в угол отклонения  $\varphi$ ; преобразователь перемеще-

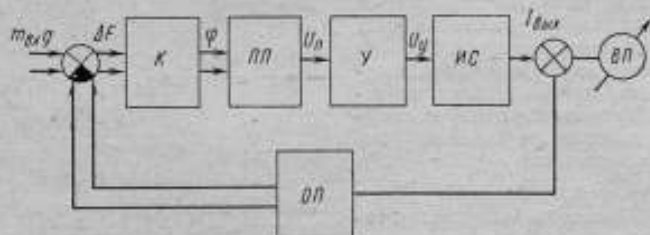


Рис. 1. Блок-схема весов с автоматическим уравниванием

ний (ПП), усилитель (У), измерительную схему (ИС) и обращенный преобразователь (ОП), вырабатывающий противодействующую силу  $F_{пр}$ . Выходной ток системы  $I_{вых}$ , пропорциональный массе груза  $m_{гх}$ , подается на выходной регистрирующий или показывающий прибор ВП. На схеме символами  $U_p$  и  $U_y$  обозначены соответственно выходные напряжения преобразователя перемещений и усилителя.

Система автоматического уравнивания — это электрический регулятор, удерживающий в положении равновесия объект регулирования — коромысло весов. Масса груза является задающим воздействием, обращенный преобразователь — регулирующим органом. Динамические свойства системы удобнее всего исследовать методами теории автоматического регулирования по структурно-функциональной схеме и передаточным функциям звеньев.



Коромысло весов при малых углах отклонения является устойчивым колебательным звеном с передаточной функцией

$$W_k(p) = W_1(p) = \frac{\varphi(p)}{m_{\text{вх}}(p)g} = \frac{K_k}{T_k^2 p^2 + 2\xi T_k p + 1}, \quad (1)$$

где  $T_k = \sqrt{\frac{J_{\text{пр}}}{M_{\text{пр}}}}$  — постоянная времени коромысла;  $\xi = \frac{M_y}{2\sqrt{J_{\text{пр}}M_{\text{пр}}}}$  —

степень успокоения коромысла;  $K_k = \frac{\varphi}{m_{\text{вх}}g} = \frac{a}{M_{\text{пр}}}$  — статический коэффициент преобразования (чувствительность) коромысла;  $J_{\text{пр}}$  — приведенный момент инерции коромысла;  $M_{\text{пр}}$  — удельный противодействующий момент коромысла;  $M_y$  — удельный момент успокоения коромысла;  $a$  — длина плеча коромысла;  $g$  — ускорение свободного падения;  $p$  — оператор Лапласа.

В качестве элемента, преобразующего угол отклонения коромысла в электрическое напряжение, используются емкостные, индуктивные, фотоэлектрические и другие бесконтактные преобразователи линейных и угловых перемещений. Обычно эти преобразователи обладают некоторой инерционностью и имеют нелинейные характеристики.

Передаточную функцию ПП в общем виде можно представить так:

$$W_{\text{п}}(p) = W_2(p) = \frac{U_{\text{п}}(p)}{\varphi} = \frac{K_{\text{п}}}{T_{\text{п}}p + 1} f(\varphi), \quad (2)$$

где  $K_{\text{п}}$  — статический коэффициент преобразования ПП;  $T_{\text{п}}$  — постоянная времени ПП;  $f(\varphi)$  — коэффициент, учитывающий нелинейность характеристики ПП.

Применяемые для весов с автоматическим уравновешиванием лампы и транзисторные усилители также обладают инерционностью и имеют нелинейную характеристику, обусловленную насыщением. Передаточная функция усилителя

$$W_y(p) = W_3(p) = \frac{U_y(p)}{U_{\text{п}}(p)} = \frac{K_y}{T_y p + 1} f(U_{\text{п}}). \quad (3)$$

Под измерительной схемой подразумеваются цепи, в которых выходное напряжение усилителя преобразуется в выходной ток  $I_{\text{вых}}$ . В эти цепи обычно входит и выходной каскад усилителя — усилитель мощности. Коэффициент преобразования измерительной схемы изменяется при переключении пределов измерения за счет изменения приведенного к выходным зажимам усилителя сопротивления делителя тока. В то же время он остается постоянным в процессе одного измерения или опыта, что позволяет ввести для измерительной схемы понятие передаточной функции, которую в общем виде можно записать

$$W_{\text{и}}(p) = W_4(p) = \frac{I_{\text{вых}}(p)}{U_y(p)} = \frac{K_{\text{и}}}{T_{\text{и}}p + 1}. \quad (4)$$

Поскольку погрешность весов с автоматическим уравновешиванием в установившемся режиме определяется в основном погрешностью обратного преобразователя, последний должен быть сконструирован так, чтобы его коэффициент преобразования оставался постоянным в диапазоне возможных перемещений коромысла. Кроме того, во всех применяемых ОП преобразование выходного тока  $I_{\text{вых}}$  в силу  $F_{\text{пр}}$  происходит без запаздывания. Поэтому передаточная функция ОП имеет такой же вид, как и его коэффициент преобразования

$$W_{\text{о}}(p) = W_{\text{оп}}(p) = \frac{F_{\text{пр}}(p)}{I_{\text{вых}}(p)} = K_{\text{оп}}. \quad (5)$$

Передаточная функция замкнутой системы

$$\Phi(p) = \frac{I_{\text{вых}}(p)}{g_{\text{вых}}(p)} = \frac{\prod_{i=1}^4 W_i(p)}{1 + \prod_{i=1}^5 W_i(p)}$$

С учетом уравнений (1)–(5)

$$\Phi(p) = \frac{K_k K_n f(\varphi) K_y f(U_n) K_n}{K_k K_n f(\varphi) K_y f(U_n) K_n K_{\text{ОП}} + (T_k^2 p^2 + 2\xi_k T_k p + 1) \times (T_n p + 1) (T_y p + 1) (T_n p + 1)}$$

Из последнего выражения можно получить характеристическое уравнение системы

$$T_k^2 T_n T_y T_n p^5 + [T_k^2 (T_n T_y + T_n T_n + T_y T_n) + 2\xi_k T_k T_n T_y T_n] p^4 + [T_k^2 (T_n + T_y + T_n) + 2\xi_k T_k (T_n T_y + T_n T_n + T_y T_n) + T_n T_y T_n] p^3 + [T_k^2 + 2\xi_k T_k (T_n + T_y + T_n) + (T_n T_y + T_n T_n + T_y T_n)] p^2 + (2\xi_k T_k + T_n + T_y + T_n) p + 1 + K_k K_n f(\varphi) K_y f(U_n) K_n K_{\text{ОП}} = 0.$$

Поскольку анализ этого уравнения представляет серьезные трудности, его следует упростить. Точнее, реальную систему целесообразно заменить моделью, которая бы достаточно воспроизводила свойства реальной системы.

В весах с автоматическим уравниванием постоянная времени корысла всегда на два-три порядка больше постоянных времени ПП, усилителя и ИС. Поэтому можно утверждать, что  $T_n T_y T_n \rightarrow 0$ ,  $T_n T_y \rightarrow 0$ ,  $T_n T_n \rightarrow 0$ ,  $T_y T_n \rightarrow 0$ .

Обозначим  $T_n + T_y + T_n = T_{\text{доп}}$ , где  $T_{\text{доп}}$  — дополнительная постоянная времени.

Сделанные допущения означают, что мы рассматриваем ПП, усилитель и ИС как безынерционные звенья, а в тракт преобразования вводим аperiodическое звено с передаточной функцией

$$W(p) = \frac{1}{T_{\text{доп}} p + 1}$$

Характеристическое уравнение замкнутой системы

$$T_k^2 T_{\text{доп}} p^3 + (T_k^2 + 2\xi_k T_k T_{\text{доп}}) p^2 + (2\xi_k T_k + T_{\text{доп}}) p + 1 + K_k K_n f(\varphi) K_y f(U_n) K_n K_{\text{ОП}} = 0.$$

Согласно критерию Раусса—Гурвица, система с характеристическим уравнением

$$a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3 = 0$$

устойчива, если  $a_0 > 0$ ,  $a_1 > 0$ ,  $a_2 > 0$ ,  $a_3 > 0$  и  $a_1 a_2 > a_0 a_3$ .

Условие  $a_3 > 0$  приводит к неравенству

$$1 + K_k K_n f(\varphi) K_y f(U_n) K_n K_{\text{ОП}} > 0,$$

которое равносильно

$$M_{\text{пр}} + a K_n f(\varphi) K_y f(U_n) K_n K_{\text{ОП}} > 0.$$

Второе слагаемое левой части неравенства имеет ту же размерность, что и  $M_{\text{пр}}$ , и носит название электрического квазиупругого противодействующего момента  $M_2$ . С учетом последнего условия устойчивости будет  $M_{\text{пр}} + M_2 > 0$ .

Система устойчива не только при  $M_{пр} = 0$  (условие исключения дрейфа [1]), но и вплоть до  $M_3 > |-M_K|$ , т. е. до тех пор, пока отрицательный квазиупругий момент коромысла (центр тяжести коромысла расположен выше оси вращения) не превысит  $M_3$ .

Приведение коромысла в состояние безразличного равновесия изменяет его передаточную функцию, которая принимает вид  $W_3(p) = K_K/p (T_K p + 1)$ ,

где  $K_K = \frac{1}{M_y}$  — динамический коэффициент преобразования коромысла;

$T_K = \frac{J_{пр}}{M_y}$  — постоянная времени коромысла.

Стабилизирующее влияние вязкого трения подвижной системы с воздухом очень мало, поэтому при рассмотрении динамических характеристик можно положить  $M_y = 0$ , имея в виду, что реальная система имеет несколько больший запас устойчивости, чем модель.

При  $M_y = 0$  и  $M_{пр} = 0$  коромысло представляет собой двойное интегрирующее звено с передаточной функцией  $W_1(p) = K_K/p^2$ , где  $K_K = 1/J_{пр}$  — динамический коэффициент преобразования коромысла.

Нелинейность характеристики усилителя обусловлена насыщением (рис. 2). Она может быть аппроксимирована ломаной линией (на рисунке отмечена пунктиром) и записана так:

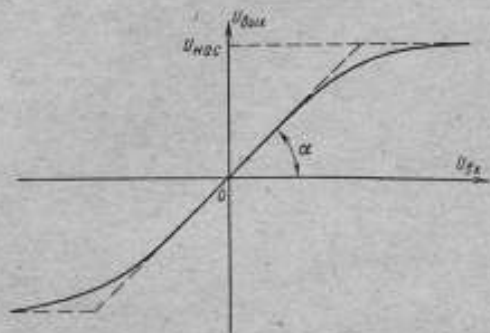


Рис. 2. Характеристика усилителя

$$U_{вых} = K_y U_{вх} \text{ при } U_{вх} < \frac{U_{нас}}{K_y};$$

$$U_{вых} = U_{нас} \text{ при } U_{вх} > \frac{U_{нас}}{K_y}.$$

Коэффициент усиления  $K_y$  определяется как тангенс угла наклона касательной в точке  $O$  к кривой  $U_{вых} = f(U_{вх})$ , т. е.  $K_y = \operatorname{tg} \alpha$ .

Преобразователь перемещений, как правило, имеет ограниченную зону линейности. На поведение системы оказывает влияние звено с меньшей зоной линейности, которая в относительных единицах может быть выражена через угол отклонения коромысла  $\varphi_d^{(n)} = U_d^{(n)}/K_n$ ;  $\varphi_d^{(y)} = U_d^{(y)}/K_n K_y$ .

Зона линейности системы:  $\varphi_d = \varphi_d^{(n)}$  при  $\varphi_d^{(n)} < \varphi_d^{(y)}$ ;  $\varphi_d = \varphi_d^{(y)}$  при  $\varphi_d^{(n)} > \varphi_d^{(y)}$ .

При таком подходе нелинейные звенья можно заменить линейными, введя в цепь прямого преобразования условное звено, у которого  $K = 1$  при  $\varphi < \varphi_d$  и  $K = f(\varphi)$  при  $\varphi > \varphi_d$ , а поведение системы рассматривать для случаев малых и больших начальных рассогласований.

С учетом сделанных допущений структурно-функциональная схема модели системы автоматического уравновешивания будет выглядеть так, как она изображена на рис. 3.

Передаточная функция разомкнутой системы при малых начальных рассогласованиях

$$W_0(p) = \prod_{i=0}^5 W_i(p) = \frac{K_K K_n K_y K_n K_{оп}}{p^2 (T_{доп} p + 1)} \quad (5)$$

То же при больших начальных рассогласованиях

$$W_0(p) = \frac{K_x K_n K_y K_n K_{оп}}{p^2 (T_{дон} p + 1)} f\left(\frac{\varphi}{\varphi_n}\right). \quad (7)$$

Если значение дополнительной постоянной времени мало и им можно пренебречь, то

$$W_0(p) = \frac{K_x K_n K_y K_n K_{оп}}{p^2}. \quad (8)$$

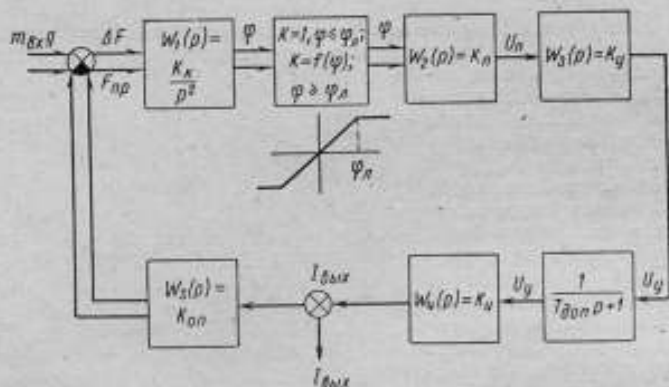


Рис. 3. Структурно-функциональная схема модели весов с автоматическим уравновешиванием

Логарифмические амплитудные характеристики (л. а. х.) 1, 2 разомкнутой системы, построенные по уравнениям (6), (8), показаны на рис. 4.

Вследствие изменения  $K_n$  (разные значения  $J_{пр}$  при различных значениях массы груза) и  $K_n$  характеристики охватывают некоторую область и соответствуют л. а. х. неустойчивых систем. В самом деле, даже при  $T_{дон} = 0$  передаточная функция замкнутой системы  $\Phi(p)$  соответствует уравнению консервативного звена

$$\Phi(p) = \frac{W_0(p)}{1 + W_0(p)} = \frac{K_x K_n K_y K_n K_{оп}}{p^2 + K_x K_n K_y K_n K_{оп}}.$$

После несложных преобразований получаем

$$\Phi(p) = \frac{K_0}{T_n^* p^2 + 1},$$

где  $K_0 = \frac{M_0}{J_{пр}}$  — динамический коэффициент преобразования

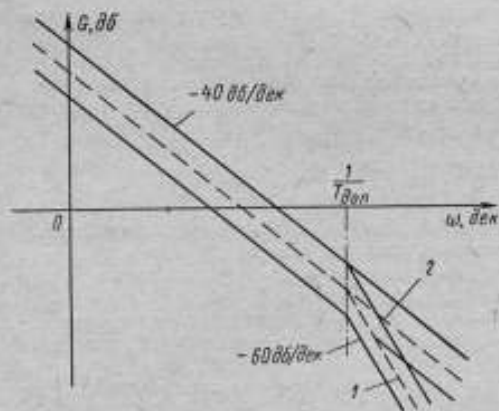


Рис. 4. Л. а. х. весов с автоматическим уравновешиванием без корректирующего звена

системы;  $T_K^* = \sqrt{\frac{J_{пр}}{M_3}}$  — постоянная времени коромысла, охваченного обратной связью.

При выведении консервативного звена из состояния покоя оно будет находиться в режиме незатухающих колебаний с периодом  $T_0^* = 2\pi T_K^*$ .

Для придания системе устойчивости необходимо введение корректирующих звеньев.

Динамические свойства системы будем рассматривать для некоторых усредненных и постоянных значений момента инерции коромысла и коэффициента преобразования измерительной схемы, когда область характеристики стягивается в линию (показана на рис. 4 пунктиром).

На рис. 5 показана типовая л. а. х. устойчивой системы 1 и л. а. х. системы 2 при  $T_{доп} = 0$ . Вычитание л. а. х. 2 из 1 дает л. а. х. 3 корректирующего звена. Такую характеристику проще всего реализовать с помощью пассивного дифференцирующего RC-контура (рис. 6) с передаточной функцией

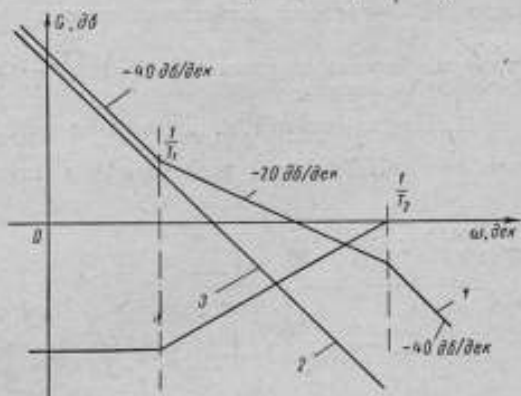


Рис. 5. К нахождению л. а. х. корректирующего звена

$$W_{дк}(p) = K_{дк} \frac{T_1 p + 1}{T_2 p + 1}, \quad (9)$$

$$\text{где } K_{дк} = \frac{r_2}{r_1 + r_2}; \quad T_1 = r_1 C; \quad T_2 = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} C.$$

Передаточная функция разомкнутой системы при введении последовательного дифференцирующего контура получается при совместном решении уравнений (8) и (9):

$$W_0(p) = \frac{K_0 (T_1 p + 1)}{p^2 (T_2 p + 1)}$$

Передаточная функция замкнутой системы

$$\Phi(p) = \frac{K_0 (T_1 p + 1)}{p^2 (T_2 p + 1) + K_0 (T_1 p + 1)}$$

Характеристическое уравнение замкнутой системы

$$T_2 p^3 + p^2 + K_0 T_1 p + K_0 = 0.$$

Условие устойчивости системы по Рауссу—Гурвицу

$$T_1 > T_2 \quad (10)$$

Из (9) видно, что условие (10) выполняется при любых параметрах дифференцирующего контура.

Для оценки запаса устойчивости наиболее удобно принять показатель колебательности  $M$  замкнутой системы. Это приводит к простому способу построения желаемой л. а. х. Аналитические зависимости, позволяющие определять параметры л. а. х. при заданном значении показателя колеба-



тельности, установлены В. А. Бесекерским [2]. Им же предложено нормировать передаточные функции системы.

Нормированная передаточная функция

$$W_0(s) = \frac{\tau_1 s + 1}{s^2 (\tau_2 s + 1)}, \quad (11)$$

где  $s = \frac{p}{\omega_0}$  — новое значение оператора;  $\tau_1 = T_1 \omega_0$ ;  $\tau_2 = T_2 \omega_0$  — относительные постоянные времени;  $\omega_0 = \sqrt{K_0}$  — круговая частота свободных колебаний системы.

Нормированная л. а. х. показана на рис. 7, где  $y = \frac{\omega}{\omega_0}$  — относительная частота. Для этой характеристики зависимость между показателем

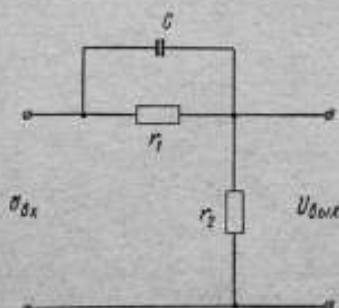


Рис. 6. Схема дифференцирующего RC-контура

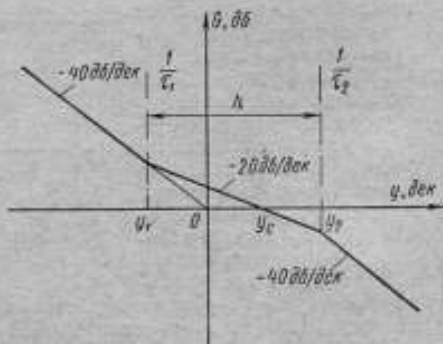


Рис. 7. Нормированная л. а. х. устойчивой системы

колебательности  $M$  и протяженностью участка  $h$  с наклоном  $-20 \text{ dB/дек}$  имеет вид [3]:

$$h = \frac{M + 1}{M - 1};$$

$$M = \frac{h + 1}{h - 1}.$$

Оптимальные значения относительных постоянных времени, соответствующие минимальному значению  $M$  при заданной величине  $h$ ,

$$\tau_1 = \sqrt{\frac{M}{M - 1}};$$

$$\tau_2 = \frac{\sqrt{M(M - 1)}}{M + 1}. \quad (12)$$

Нормированная передаточная функция системы с учетом дополнительной постоянной времени

$$W_0(s) = \frac{\tau_1 s + 1}{s^2 (\tau_2 s + 1) (\tau_3 s + 1)},$$

где  $\tau_3 = T_{\text{дон}} \omega_0$ .

Передаточная функция замкнутой системы

$$\Phi(s) = \frac{\tau_1 s + 1}{s^2 (\tau_2 s + 1) (\tau_3 s + 1) + (\tau_1 s + 1)}$$

Характеристическое уравнение замкнутой системы

$$\tau_2 \tau_3 s^4 + (\tau_2 + \tau_3) s^3 + s^2 + \tau_1 s + 1 = 0.$$

Условие устойчивости по Рауссу—Гуранцу

$$(\tau_2 + \tau_3 - \tau_1 \tau_2 \tau_3) \tau_1 > (\tau_2 + \tau_3)^2.$$

Если учесть, что  $\tau_2 + \tau_3 \gg \tau_1 \tau_2 \tau_3$ , неравенство принимает вид

$$h = \frac{\tau_1}{\tau_2} > 1 + \frac{\tau_3}{\tau_2}.$$

При  $\tau_3 = \tau_2$   $h = \frac{\tau_1}{\tau_2} > 2$ .

Сравнивая это условие с условием устойчивости (10) системы без дополнительной постоянной времени ( $h = \frac{\tau_1}{\tau_2} > 1$ ), видим, что наличие в системе

звеньев с запаздыванием требует увеличения протяженности участка с наклоном  $-20$  дБ/дек.

Увеличение значения  $h$  может быть получено за счет уменьшения относительной постоянной времени  $\tau_2$  при неизменном значении  $\tau_1$ . При этом переходные процессы в системах будут различаться только в начальных стадиях и в целом будут очень близки к совпадению, поскольку логарифмические амплитудные характеристики различаются только в высокочастотной области (рис. 8).

Новое значение относительной постоянной времени определяется выражением [3]:

$$\tau_2 = \frac{\tau_1 (\tau_2 - \tau_3)}{\tau_1 + \tau_2}. \quad (13)$$

Обычно  $\tau_3 \ll \tau_1$ , поэтому  $\tau_2 \approx \tau_2 - \tau_3$  и выражение (13) для нормированной передаточной функции разомкнутой системы с учетом дополнительной постоянной времени может быть заменено прежним уравнением (11), в котором

$$\tau_1 = \sqrt{\frac{M}{M-1}}; \quad \tau_2 = \frac{\sqrt{M(M-1)}}{M+1} - \tau_3. \quad (14)$$

Связь между параметрами нормированной л. а. х., перерегулированием и временем установления показаний осуществляется через уравнение переднего процесса системы

$$Y_{\text{вых}}(\tau) = f(x_{\text{вх}}, \tau_1, \tau_2).$$

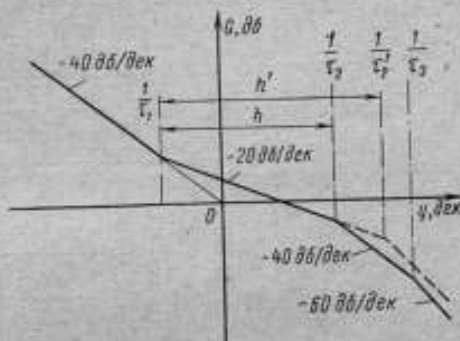


Рис. 8. Нормированная л. а. х. устойчивой системы с учетом дополнительной постоянной времени

Характеристическое уравнение системы (стандартная переходная функция)

$$\tau_2 s^3 + s^2 + \tau_1 s + 1 = 0$$

приводится к виду

$$x^3 + px + q = 0$$

подстановкой  $s = x - 1/3\tau_2$ ,

$$\text{где } p = \frac{3\tau_1\tau_2 - 1}{\tau_2^2}; \quad q = \frac{3\tau_2 - \tau_1}{3\tau_2^3}.$$

С учетом уравнения (12)

$$p = \frac{(2M-1)(M+1)}{3M(M-1)}; \quad q = \frac{(M-2)(M+1)}{3\sqrt{M(M-1)^3}}. \quad (15)$$

Корни кубического уравнения в приведенной форме находятся по формуле [4]

$$x = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{3}\right)^3}} + \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{3}\right)^3}}.$$

Ввиду того, что при любых значениях  $M \left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{3}\right)^3 > 0$ , характеристическое уравнение имеет один вещественный и два комплексно-сопряженных корня:

$$s_1 = \lambda = \sqrt{-\frac{q}{2} + \sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{3}\right)^3}} + \sqrt{-\frac{q}{2} - \sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{3}\right)^3}} - \frac{1}{3\tau_2}. \quad (16)$$

$$s_{2,3} = \alpha \pm j\omega = -\frac{1}{2} \left( \lambda + \frac{1}{3\tau_2} \right) \pm \pm j \frac{\sqrt{3}}{2} \left[ \lambda + \frac{1}{3\tau_2} - 2 \sqrt{-\frac{q}{2} - \sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{3}\right)^3}} \right].$$

Оригинал стандартной переходной функции в случае одного вещественного и двух комплексно-сопряженных корней определяется соотношением [5]:

$$\bar{Y}_{\text{вых}}(\tau) = 1 - \left[ \frac{\lambda(\lambda - 2\alpha)}{(\lambda - \alpha)^2 + \omega^2} \cos \omega\tau - \frac{\lambda(\omega^2 - \alpha^2 + \lambda\alpha)}{\omega[(\lambda - \alpha)^2 + \omega^2]} \sin \omega\tau \right] e^{\lambda\tau} - \frac{\alpha^2 + \omega^2}{(\lambda - \alpha)^2 + \omega^2} e^{\lambda\tau}. \quad (17)$$

Переходный процесс в системе при единичном скачкообразном входном воздействии

$$Y_{\text{вых}}(\tau) = \tau_1 \bar{Y}_{\text{вых}} + \bar{Y}_{\text{вых}}(\tau),$$

при импульсном входном воздействии

$$Y_{\text{имп}}(\tau) = \dot{Y}_{\text{вых}}(\tau)$$

и при изменении входной величины с постоянной скоростью по закону  $x_{вх} = U_0 \tau$

$$Y_{скор}(\tau) = U_0 \int_0^{\tau} Y_{вых}(\tau) d\tau.$$

Подставляя в последнее уравнение выражение (17), получим:

$$Y_{вых}(\tau) = 1 + (A \cos \omega \tau + B \sin \omega \tau) e^{\alpha \tau} - C e^{\lambda \tau}; \quad (18)$$

$$Y_{имп}(\tau) = [(B\omega - A\alpha) \cos \omega \tau + (A\omega + B\alpha) \sin \omega \tau] e^{\alpha \tau} - \lambda C e^{\lambda \tau}; \quad (19)$$

$$Y_{скор}(\tau) = U_0 \tau + U_0 \frac{e^{\alpha \tau}}{\alpha^2 + \omega^2} (A\alpha - B\omega) \cos \omega \tau + (A\omega + B\alpha) \sin \omega \tau - CU_0 \frac{e^{\lambda \tau}}{\lambda}, \quad (20)$$

$$\text{где } A = \frac{\lambda [\tau_1 (\omega^2 - \alpha^2) + (2\alpha - \lambda)]}{(\lambda - \alpha)^2 + \omega^2};$$

$$B = \frac{\lambda \{ \omega^2 [\tau_1 (\lambda - \alpha) + 1] + \alpha (\lambda - \alpha) (\tau_1 \alpha + 1) \}}{\omega [(\lambda - \alpha)^2 + \omega^2]}; \quad (21)$$

$$C = \frac{(\alpha^2 + \omega^2) (\tau_1 \lambda + 1)}{(\lambda - \alpha)^2 + \omega^2}.$$

Уравнения (15), (16), (18) + (21) дают возможность рассчитать переходные процессы для различных значений показателя колебательности  $M$ , по которым легко могут быть найдены значения относительного времени установления показаний  $\tau_y = \omega_0 t_y$  для  $|1 - Y_{вых}(\tau)| < \epsilon$  и перерегулирования  $\sigma$ .

В таблице приведены расчетные значения  $\sigma$  и  $\tau_y$  для  $|1 - Y_{вых}(\tau)| < 0,01$  при единичном скачкообразном входном воздействии.

|              |     |     |     |      |      |
|--------------|-----|-----|-----|------|------|
| $M$          | 1,1 | 1,3 | 1,5 | 1,7  | 1,9  |
| $\sigma, \%$ | 12  | 18  | 28  | 40   | 53   |
| $\tau_y$     | 5,0 | 6,2 | 8,3 | 10,8 | 14,2 |

Табличные данные хорошо подтверждаются экспериментом.

Наиболее удобным методом оценки алианса насыщения является графоаналитический метод, предложенный Л. С. Гольдфарбом и являющийся одной из разновидностей метода гармонического баланса.

Комплексный коэффициент усиления по первой гармонике для нечетной функции  $[f(-x_0)] = [-f(x_0)]$  нелинейного звена, имеющего зависимость  $x_2 = f(x_1)$ , может быть записан

$$\bar{K}_н = \frac{\bar{x}_2}{x_1} = g(A) + jb(A),$$

$$\text{где } g(A) = \frac{1}{\pi A} \int_0^{2\pi} f(A \sin \omega t) \sin \omega t d\omega t;$$

$$b(A) = \frac{1}{\pi A} \int_0^{2\pi} f(A \sin \omega t) \cos \omega t d\omega t;$$

$A$  — амплитуда входного сигнала.

Входная величина имеет вид  $x_1 = A \sin \omega t$ , выходная представляет собой несинусоидальную периодическую функцию. При однозначной нечет-

ной функции  $x_2 = f(x_1)$  выражение для  $\bar{K}_n$  упрощается, так как составляющая  $b(A)$  оказывается равной нулю и  $\bar{K}_n$  становится действительным числом  $K_n$  (между  $x_1$  и  $x_2$  нет сдвига по фазе).

На рис. 9 приведен график изменения выходной величины  $x_2(t)$  при работе в зоне насыщения. Из рисунка следует, что  $a = A \sin \alpha$ , откуда

$$f(A \sin \omega t) = KA \sin \omega t \quad \text{при } 0 < \omega t < \alpha;$$

$$f(A \sin \omega t) = KA \sin \alpha \quad \text{при } \alpha < \omega t < \pi - \alpha;$$

$$f(A \sin \omega t) = KA \sin \omega t \quad \text{при } \pi - \alpha < \omega t < \pi;$$

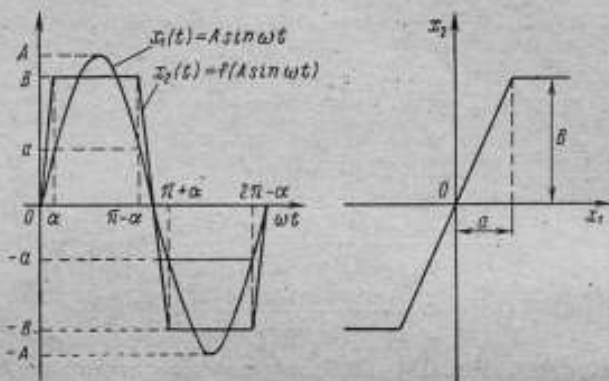


Рис. 9. Характеристика усилителя при работе в зоне насыщения

Коэффициент усиления на линейном участке  $K = \frac{B}{a}$ . Коэффициент усиления на нелинейном участке

$$K_n = \frac{2}{2\pi A} \left( 2 \int_0^{\alpha} KA \sin \omega t \sin \omega t dt + \int_0^{\pi-\alpha} KA \sin \alpha \sin \omega t dt = \frac{2K}{\pi} \left( \alpha - \frac{1}{2} \sin 2\alpha \right) \right).$$

При переходе к безразмерной форме записи

$$K_n = \frac{2\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{\pi};$$

уравнение справедливо при  $\frac{A}{a} > 1$ . Если  $\frac{A}{a} < 1$ , то  $K_n = 1$ .

На рис. 10 представлен график зависимости  $K_n = f\left(\frac{A}{a}\right)$ . Условие существования автоколебаний в системе [6]:

$$-W_n(jy) = \frac{1}{K_n(A)}$$

Решение данного уравнения удобнее всего произвести путем построения на комплексной плоскости характеристик  $-W_n(jy)$  и  $\frac{1}{K_n(A)}$ , т. е. ампли-



тудно-фазовой характеристики  $W_n(j\omega)$  линейной части, взятой с обратным знаком, и характеристики  $z_n = \frac{1}{K_n(A)}$  для нелинейного звена. Если характеристики не пересекаются, то автоколебания в данной системе невозможны.

Амплитудно-фазовая характеристика разомкнутой системы получается при замене в выражении передаточной функции разомкнутой системы оператора  $z$  на  $j\omega$ :

$$-W_n(j\omega) = \frac{1 + \omega^2 \tau_1 \tau_2}{\omega^2 (1 + \omega^2 \tau_2^2)} + j \frac{\tau_1 - \tau_2}{\omega^2 (1 + \omega^2 \tau_2^2)}$$

На рис. 11 изображены характеристики  $z_n \left( \frac{A}{a} \right)$  и  $-W_n(j\omega)$  линейной части системы для различных значений постоянных времени  $\tau_1$  и  $\tau_2$ . Харак-

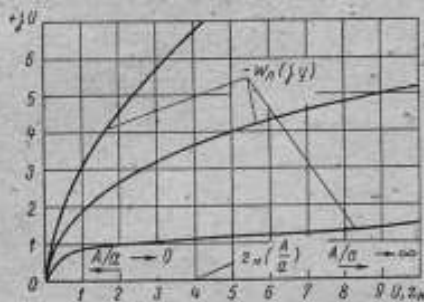
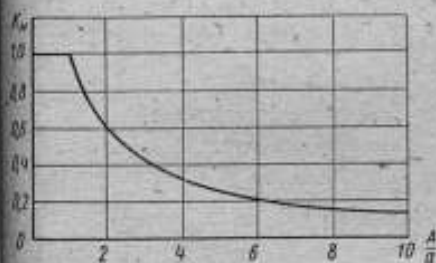


Рис. 10. Зависимость коэффициента преобразования нелинейного звена от амплитуды входного сигнала

Рис. 11. К определению устойчивости системы с нелинейным звеном

теристики  $-W_n(j\omega)$  не охватывают точки  $1; j0$  при  $\tau_1 < \tau_2$  (система как линейная устойчива) и не пересекаются с характеристикой  $z_n \left( \frac{A}{a} \right)$ .

Таким образом, сколь малой ни была бы зона линейности  $\Phi_{\text{л}}$ , равновесие в системе наступит при любых начальных рассогласованиях. Тем не менее малая зона линейности вызывает существенное изменение в характере переходного процесса. Выход системы за пределы зоны линейности при больших начальных рассогласованиях равносильен уменьшению коэффициента преобразования (см. рис. 10), что неблагоприятно влияет на характер переходного процесса.

На рис. 12, а и б показаны экспериментальные кривые переходных процессов при единичном скачкообразном входном воздействии и начальном воздействии больше единичного, которое система получает при ручном вводе коромысла из изолированного в рабочее положение. Как видно, при больших начальных рассогласованиях резко возрастает колебательность, увеличивается время установления показаний.

Большие начальные рассогласования в весах с автоматическим уравновешиванием обусловлены работой изолирующего механизма и механизма автоматического гиреналожения, который включает четыре гири на один десятичный разряд, управляемые кулачками. Диаграмма нагрузок коромысла при работе гиревого механизма показана на рис. 13. При переходе механизма с четвертой позиции на пятую на аходе системы могут действовать нагрузки, превышающие единичное воздействие в четыре раза.

Схема изолирующего механизма равноплечих призмных весов типа ВЛА-200г представлена на рис. 14. В изолированном положении зазор между опорной призмой и подушкой составляет 0,2—0,3 мм, а упоры коромысла находятся на расстоянии 40 мм от оси вращения. Начальный угол рассогласования при вводе коромысла в рабочее состояние может достигать до 0,005—0,007 рад.

При наличии механизма автоматического гиреналожения зона линейности системы с последовательными корректирующими звеньями должна

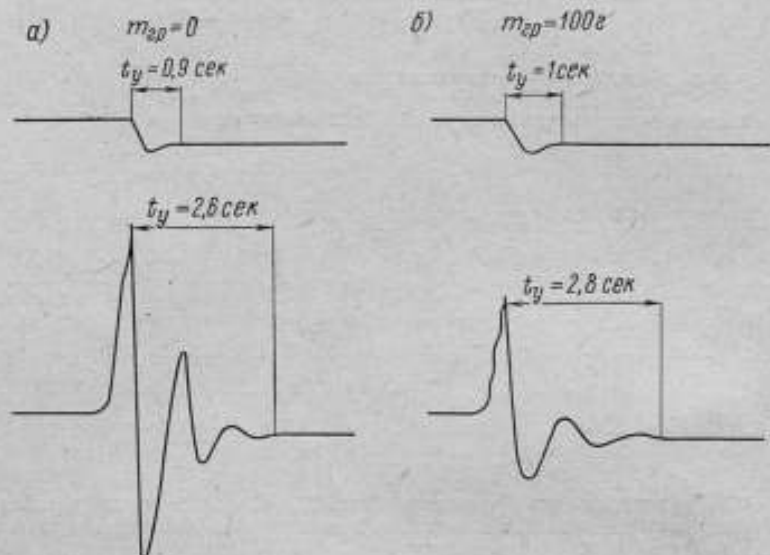


Рис. 12. Кривые переходных процессов системы с нелинейным звеном при больших и малых начальных рассогласованиях

быть в 3—4 раза больше рабочей зоны, но не менее 0,005—0,007 рад. Математически это можно записать следующим образом:

$$\varphi_{л} = \frac{U_{нас}^{(y)}}{K_{п}K_{у}} > 0,005 + 0,007 \text{ рад} \approx 3 + 4\varphi_{р};$$

$$\varphi_{л} = \frac{U_{нас}^{(n)}}{K_{п}} > 0,005 + 0,0007 \text{ рад} \approx 3 + 4\varphi_{р},$$

где  $U_{нас}^{(y)}$ ,  $U_{нас}^{(n)}$  — напряжение насыщения усилителя и ПП.

Из этих формул следует, что на значение коэффициентов преобразования  $K_{п}$  и  $K_{у}$  накладывается ограничение:

$$K_{п} < \frac{U_{нас}^{(n)}}{0,005 + 0,007}; \quad K_{у} < \frac{U_{нас}^{(y)}}{(0,005 + 0,007) K_{п}}.$$

С ростом  $K_{у}$  и  $K_{п}$  уменьшается зона линейности  $\varphi_{л}$  системы и при  $\varphi_{л} < 0,005 \text{ рад}$  дальнейшее увеличение  $K_{у}$  и  $K_{п}$  теряет смысл из-за влияния насыщения.

Выбор значений коэффициентов преобразования измерительной схемы и обратного преобразователя ограничен неравенством [1]:

$$K_{\text{ш}} K_{\text{ОП}} < \frac{\delta_{\text{ш}} m_{\text{кг}}}{U_{\text{ш}}}$$

где  $m_{\text{ш}}$  — диапазон измерения массы по шкале выходного прибора;  $U_{\text{ш}}$  — напряжение шума усилителя;  $\delta_{\text{ш}}$  — допустимая погрешность шума.

Ограничены также значения следующих параметров: электрического квазиупругого противодействующего момента

$$M_{\Delta} = K_{\text{п}} K_{\text{у}} K_{\text{ш}} K_{\text{ОП}} < K_{\text{п max}} K_{\text{у max}} (K_{\text{ш}} K_{\text{ОП}})_{\text{max}}$$

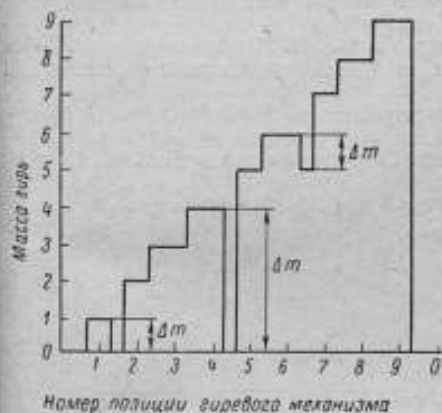


Рис. 13. Диаграмма работы гиревого механизма

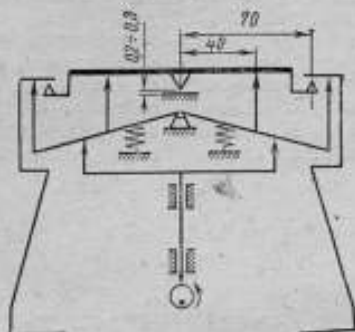


Рис. 14. Схема изолирующего механизма призматических равноплечих весов

коэффициента преобразования разомкнутой системы

$$K_{\theta} < \frac{M_{\Delta \text{ max}}}{J_{\text{пр}}}$$

и базовой частоты

$$\omega_0 < \sqrt{K_{\theta \text{ max}}}$$

Для заданного момента инерции коромысла, определенного типа ПП и усилителя в весах с автоматическим уравниванием при стабилизации их последовательным корректирующим контуром существует предельное быстроедействие, повысить которое без ухудшения точностных характеристик уже невозможно

$$t_{\text{y}} = \frac{\tau_{\text{y}}}{\omega_0} < \frac{\tau_{\text{y}}}{\omega_{\theta \text{ max}}}$$

При современном уровне развития количественного анализа, когда весы применяются для регистрации сравнительно медленно протекающих процессов, всегда удается выбрать достаточную зону линейности и получить требуемое быстроедействие. По мере развития техники кинетических исследований потребуется регистрировать процессы с резкими фазовыми превращениями.

Достижение минимального времени регулирования (меньшего, чем в линейных) возможно в нелинейных системах, в частности, в релейных системах с нелинейной дополнительной обратной связью. Поэтому в настоящее время следует начать теоретические исследования и поиски путей технической реализации оптимальных по быстродействию весов с автоматическим уравниванием.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Феохтистов В. Г. Разработка, теоретические и экспериментальные исследования весов с автоматическим уравниванием. Автореф. дисс. ВНИИМ, 1969.
2. Бесекерский В. А. Синтез электрических следящих систем малой мощности. Автореф. дисс. ЛЭТИ, 1956.
3. Бесекерский В. А., Орлов В. П., Полонская Л. В., Федоров С. М. Проектирование следящих систем малой мощности, Судпромгиз, 1962.
4. Краткий физико-технический справочник, т. 1. Под ред. К. П. Яковлева. Изд-во физ.-матем. лит-ры, 1960.
5. Приборы и средства автоматики. Справочник под ред. С. С. Шедрицкого, «Машиностроение», 1964.
6. Васильев Д. В., Филиппов Г. С. Основы теории и расчета следящих систем. Госэнергоиздат, 1959.

Поступила в редакцию 14/IV 1970 г.

УДК 681.261.2.088

В. Я. КУЗЬМИН  
Завод «ГОСМЕТР»

#### АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ АНАЛИТИЧЕСКИХ ВЕСОВ С ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ КОДОВЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ

Одной из важных задач современного весостроения является создание надежных и точных приборов, выдающих информацию в форме, удобной для передачи на ЭЦВМ или на устройства контроля и управления технологическими процессами. Перспективными в этом отношении являются лабораторные весы с фотоэлектрическими кодовыми преобразователями (ФКП), обеспечивающими выход информации в цифровом виде. Поэтому в настоящее время разрабатывается большое число аналитических весов специального и общего назначения с ФКП.

Фотоэлектрический кодовый преобразователь (см. рисунок) состоит из осветительного устройства (лампа подсветки 1, конденсор 2), кодовой маски 3, закрепленной на коромысле, и считывающего устройства (объектив 4, чувствительные элементы 5, усилители 6 и пороговые элементы 7). В качестве чувствительных элементов считывающего устройства используются фотосопротивления, имеющие малые геометрические размеры, высокую чувствительность, малую температурную зависимость.

Принцип действия ФКП состоит в следующем. Под действием веса измеряемого образца коромысло отклоняется на угол, пропорциональный массе образца. Шкала с кодовой маской перемещается в новое положение, и на чувствительные элементы проектируется часть кодовой маски, соответствующая измеряемому значению массы.

Сигналы с чувствительных элементов, сопротивление которых зависит от перепада освещенности, усиливаются и поступают на пороговые элементы; далее информация поступает на дешифратор. С выхода дешифратора она передается на индикаторное и цифропечатающее устройства в виде определенного кода

$$N = \sum_{i=1}^n x_i a_i,$$

где  $x_i = 1$  при наличии сигнала в  $i$ -м разряде;  $x_i = 0$  при отсутствии сигнала в  $i$ -м разряде;  $a_i$  — весовые коэффициенты выбранной системы счисления.

Погрешность весов с ФКП зависит от погрешности самих весов  $\delta_{\text{в}}$ , погрешности квантования  $\delta_{\text{к}}$  фотоэлектрического кодового преобразователя и погрешности считывающего устройства  $\delta_{\text{сч}}$ .

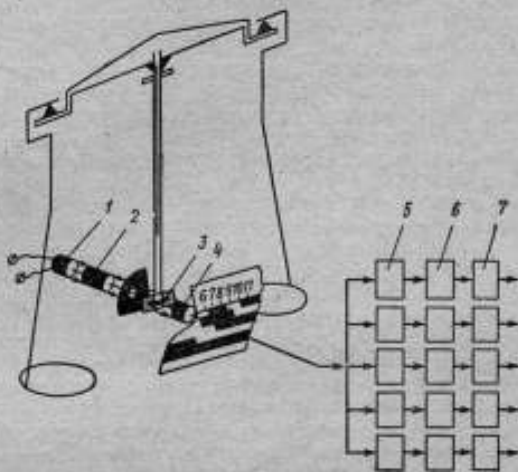
Погрешность весов  $\delta_{\text{в}}$  определяется вариацией показаний весов, погрешностью встроенных гирь и некоторыми другими факторами. Эти погрешности достаточно хорошо известны и поэтому не требуют подробного анализа.

Погрешность квантования  $\delta_{\text{к}} = \frac{\tau}{2}$ , где  $\tau$  — величина проекции одного кванта, изображенного на экране.

Погрешность квантования зависит от числа дискретных уровней, нанесенных на кодовой маске. В разработанных приборах длина одного дискретного уровня кодовой маски составляет 0,05 мм. Поэтому для аналитических весов с углом отклонения до  $3^\circ$  и длиной шкалы около 10 мм число уровней квантования не превышает 200. Погрешность квантования этих весов может быть порядка 0,25% от предела измерения по шкале.

Для лабораторных квадратных весов с углом отклонения  $12^\circ$  и длиной шкалы 30—40 мм число уровней квантования достигает 1000, при этом погрешность квантования будет равна 0,05% от предела измерения по шкале.

Анализ погрешности считывающего устройства показывает, что она включает погрешность электрической схемы, неточность установки чувствительных элементов и кодовой маски, погрешность изготовления кодовой маски, которые независимы и имеют случайный характер. Дисперсия суммарной погрешности считывающего устройства будет равна сумме дисперсий, т. е.



Весы с фотоэлектрическим кодовым преобразователем

$$D_{\text{сч}} = \sum_{i=1}^k D_i. \quad (1)$$

Из (1) можно определить среднее квадратическое отклонение для считывающего устройства

$$\sigma_{\text{сч}} = \sqrt{\sum_{i=1}^k D_i}. \quad (2)$$

Особое внимание следует обратить на погрешность, вносимую электрической схемой считывающего устройства. Эта погрешность зависит от нестабильности области срабатывания порогового элемента, изменения напряжения питания, нестабильности элементов электрической схемы и т. д. Погрешность электрической части считывающего устройства определяется из уравнения

$$q_{\text{эл}} = f(W_1, W_2, \dots, W_l).$$



Это уравнение характеризует зависимость положения шкалы, при котором происходит срабатывание пороговых устройств, от изменения параметров электрической схемы  $W_1, W_2, \dots, W_k$ , влияющих на стабильность срабатывания считывающего устройства.

Анализируя электрическую схему и зная изменчивость параметров  $W_1, W_2, \dots, W_k$  различных элементов электрической схемы (сопротивлений, напряжений и т. д.), можно рассчитать дисперсию погрешности, вносимой электрической схемой,

$$D_{\Sigma} = \sum_{j=1}^r \left( \frac{\partial q_{\Sigma}}{\partial W_j} \right)^2 D(W_j).$$

Так как погрешность электрической схемы является одной из составляющих погрешности считывающего устройства, то при определении суммарной дисперсии погрешности этого устройства значение дисперсии войдет в уравнение (1).

Экспериментально определено, что при установке чувствительных элементов в общей оправке неточность их расположения составит 0,3 мм. Эту погрешность можно уменьшить, если устанавливать и регулировать отдельно каждый элемент.

Погрешности изготовления кодовой маски (погрешности при вычерчивании макета кодовой маски, погрешности при фотографировании и печати) и неточность ее установки также влияют на погрешность считывающего устройства. Суммарная погрешность считывающего устройства достигает величины (0,1—0,2) τ, что составляет 0,05% от предела измерения по шкале аналитических весов и 0,01% от предела измерения по шкале квадрантных весов.

Из анализа и расчета погрешностей следует, что наибольшую погрешность вносит неточность установки чувствительных элементов, которая составляет примерно 60% от суммарной погрешности считывающего устройства. Погрешности считывающего устройства и самих весов подчиняются нормальному закону распределения. Погрешность квантования имеет равномерный закон распределения вероятностей.

Закон распределения суммарной погрешности весов с ФКП определяется композицией законов распределения погрешностей самих весов, считывающего устройства и погрешности квантования и зависит от соотношения значений этих погрешностей. Так как эти погрешности независимы, то среднее квадратическое отклонение измерений на весах с ФКП можно определить по формуле

$$\sigma = \sqrt{\sigma_n^2 + \sigma_{\text{сч}}^2 + \sigma_k^2},$$

где  $\sigma_n$  — среднее квадратическое отклонение измерений на весах;  $\sigma_k = \frac{\tau}{2\sqrt{3}}$  — среднее квадратическое отклонение квантования.

По определенным выше формулам можно легко рассчитать суммарную погрешность весов с ФКП и определить их технические характеристики.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гитис Э. Н. Преобразователи информации для электронных цифровых вычислительных устройств. Госэнергоиздат, 1961.
2. Дроздов Е. А., Пятибратов А. П. Автоматическое преобразование и кодирование информации. «Советское радио», 1964.

Поступила в редакцию 24/VII 1970 г.

ВНИИМ

УСТАНОВКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
МАГНИТНОГО МОМЕНТА ГИРЬ

К точным гирям предъявляются жесткие требования в отношении магнитных характеристик материала. Если материал, из которого изготовлена гиря, магнитен, то изменение положения гири в пространстве вызывает кажущееся изменение ее массы. Размагничивание гири не приводит к желаемым результатам, так как такая гиря вновь намагничивается блуждающими магнитными полями. При этом следует иметь в виду, что детали весов (арретир, подвески, чашки весов) часто бывают магнитными. При использовании на таких весах магнитных гирь ошибки во взвешивании достигают значительной величины.

В связи с изготовлением новых эталонов массы и новых образцовых гирь первого и второго разрядов и гирь 1-, 2-го классов во ВНИИМ проводились работы по изысканию немагнитной аустенитной нержавеющей стали для изготовления этих гирь.

В качестве характеристики магнитного состояния материала гирь был выбран магнитный момент. В системе CGSM за единицу магнитного момента принимается магнитный момент магнита длиной 1 см, каждый из магнитных полюсов которого обладает магнитной массой, равной одной единице CGSM. Была создана установка для определения магнитного момента гирь. Чтобы проверить, как влияет магнитность гири на точность взвешиваний были проведены следующие опыты. Две гири массой в 1 кг из аустенитной нержавеющей стали марки X18H9T с магнитным моментом при полном насыщении, равным примерно 50 ед. CGSM, были сличены на весах. При этом под чашки весов подкладывались плиты из мягкого железа. Во второй серии сличений одна из гирь была перевернута и поставлена на свое верхнее основание. В третьей серии сличений гири были поставлены так же как и в первой. Эти опыты показали, что изменение положения гири вызывает кажущееся изменение ее массы на 3,35 мг.

При сличении аналогичным образом двух гирь с магнитным моментом при насыщении в пределах 2—3 ед. CGSM установлено, что изменение положения гири вызывает кажущееся изменение массы до 0,14 мг. Последние две гири были размагничены до магнитного момента 0,038 ед. CGSM и вновь сличены указанным выше способом. В этом случае при изменении положения гири в пространстве кажущегося изменения их массы в пределах погрешностей измерений (0,01 мг) не наблюдалось. Таким образом, можно прийти к выводу, что для точных гирь допустимая величина магнитного момента при полном насыщении в пересчете на гирю в 1 кг должна составлять не более 1—2 ед. CGSM.

В национальной физической лаборатории Англии исследовались несколько марок аустенитной нержавеющей стали с целью выбора наиболее подходящего материала для изготовления точных гирь, а именно: Cr18Ni10, Cr18Ni12, Cr10Ni20, Cr25Ni15, Cr25Ni20. Эти образцы исследовались сразу же после их изготовления; затем часть образцов подвергалась холодной обработке с усадкой на 33%, а после этого некоторые образцы дополнительно нагревались в вакууме до 700° С, выдерживались в течение часа и охлаждались в вакууме. Как показали опыты, стали Cr18Ni10 и Cr25Ni15 недостаточно немагнитны и их нельзя использовать для изготовления точных гирь. Стали Cr18Ni12 и Cr10Ni20 в достаточной степени немагнитны, если их не подвергать жестким испытаниям нагревом в вакууме до 700° С. И только сталь марки Cr25Ni20 была удовлетворительна в магнитном отношении при всех указанных выше испытаниях и имела очень малый магнитный

момент в пересчете на один килограмм, не превышающий 0,001 ед. CGSM. Эту марку стали можно рекомендовать для изготовления точных гирь.

Опыты показали, что некоторые немагнитные аустенитные нержавеющие стали, взятые для изготовления точных гирь, в процессе механической обработки гирь становятся магнитными; отдельные болванки одной и той же марки стали магнитны в разной мере. Например, в 1956 г. были изготовлены эталонные гири из нержавеющей стали марки X18H9T. В то время в лаборатории не было установки для определения магнитных характеристик материала гирь, поэтому намагниченность их проверялась лишь качественно.

В течение тринадцати лет гири применялись для работы и показали хорошую стабильность массы. В 1969 г. они были исследованы на установке, созданной в лаборатории. Оказалось, что магнитный момент гирь при полном насыщении очень мал (не превышал 0,002 ед. CGSM).

В 1959 г. из той же марки стали (но из другой партии) было изготовлено еще несколько гирь. При исследовании плотности и взвешивании гирь обратило на себя внимание то обстоятельство, что в измерениях имеются значительные необъяснимые ошибки. Исследование показало, что магнитный момент отдельных гирь составлял 50 ед. CGSM. Размагничивание гирь не привело к положительным результатам, так как гири вновь быстро намагничивались в лабораторных условиях. Применять гири для работы оказалось невозможным.

Было принято решение изготовить новые гири из стали марки Cr23Ni18, которая оказалась в высокой степени немагнитной. Из этой же марки стали были изготовлены образцовые гири 1- и 2-го разрядов и гири 1- и 2-го классов.

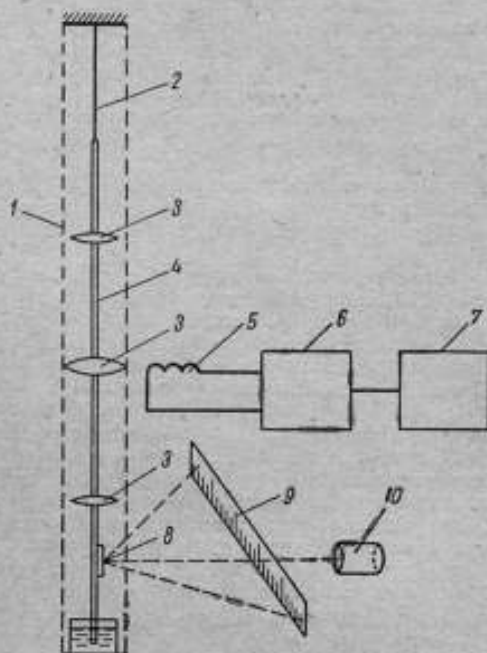


Схема прибора для определения магнитного момента гирь

На основании опыта приходим к выводу о необходимости исследовать готовые гири на магнитные свойства материала. Для этой цели была изготовлена специальная установка, представляющая собой астатический магнитометр (см. рисунок), состоящий из подвижной (измерительной) системы, счетного приспособления и приспособления для установки исследуемой гири.

Подвижная (измерительная) система представляет собой три эллипсоидальных магнита 3, закрепленных в горизонтальном положении на стеклянной трубке 4 с помощью держателей. Стеклянная трубка 4 подвешена на нити кручения 2, закрепленной с помощью держателя сверху широкой стеклянной трубки 1, являющейся корпусом измерительной части прибора и предохраняющей последнюю от внешних воздействий.

Держатель нити кручения представляет собой латунную головку, при помощи которой подвижную систему можно поворачивать вокруг собственной оси и вдоль ее. В нижней части трубки 1 расположена чашка с минераль-

ным маслом, в которое погружен конец стеклянной трубки 4; благодаря этому обеспечивается демпфирование колебаний подвижной системы. Трубка 1 смонтирована на деревянной подставке, установленной на фундаменте.

Отсчетное приспособление состоит из освещенной шкалы 9, зеркала 8, укрепленного на трубке 4, и зрительной трубы 10. В трубке 1, напротив зеркала, смонтировано плоскопараллельное стекло.

Приспособление для установки исследуемой гири представляет собой деревянный желоб на подставке (на рисунке не показан), расположенный на уровне среднего магнита 3.

Принцип измерения магнитного момента исследуемой гири заключается в следующем. Сравнивается взаимодействие исследуемой гири и среднего из магнитов 3 с взаимодействием этого магнита и катушки 5, магнитный момент которой известен. При этом катушка устанавливается на том же расстоянии от магнита, что и исследуемая гиря, а поперечное сечение и длина катушки равны соответствующим размерам исследуемой гири. Катушка представляет собой каркас из эбонита, на который намотана медная проволока поперечным сечением 0,31 мм. Катушка включается через специальный мост 6 в сеть переменного тока частотой 50 гц.

Магнитный момент катушки  $M_k = nsi$ , где  $n$  — число витков катушки на 1 см длины;  $s$  — поперечное сечение катушки;  $i$  — сила тока, протекающего по катушке.

Сила тока  $i$  определяется с помощью амперметра 7. Для определения магнитных моментов гирь граммового и килограммового наборов был изготовлен набор из 11 катушек, характеристики которых приведены в таблице.

| Номер катушки | Диаметр, мм | Высота, мм | $\rho^2$ , см <sup>4</sup> | Номер катушки | Диаметр, мм | Высота, мм | $\rho^2$ , см <sup>4</sup> |
|---------------|-------------|------------|----------------------------|---------------|-------------|------------|----------------------------|
| 1             | 9           | 15         | 32                         | 7             | 41          | 65         | 1826                       |
| 2             | 11          | 20         | 60                         | 8             | 53          | 85         | 2702                       |
| 3             | 14          | 24         | 125                        | 9             | 66          | 105        | 5062                       |
| 4             | 19          | 32         | 276                        | 10            | 90          | 145        | 15 560                     |
| 5             | 24          | 40         | 610                        | 11            | 114         | 180        | 28 712                     |
| 6             | 30          | 50         | 1051                       |               |             |            |                            |

Для измерений используется средний из магнитов 3; крайние магниты служат для уменьшения влияния на результат измерения внешних возмущающих магнитных полей. Магнитные моменты крайних магнитов в два раза меньше магнитного момента среднего магнита и направлены обратно магнитному моменту среднего магнита.

Магнитный момент гири определяется следующим образом. Гиря, намагниченная в равномерном постоянном магнитном поле до полного насыщения, устанавливается на желобе таким образом, чтобы ее торцевая поверхность располагалась напротив среднего магнита 3. При этом подвижная система магнитометра повернется на некоторый угол, которому соответствует отсчет  $l_1$  по шкале. Затем гирю поворачивают, при этом подвижная система магнитометра повернется в другую сторону; отсчет по шкале будет  $l_2$ . После этого гиря снимается с желоба и заменяется соответствующей цилиндрической катушкой, которая устанавливается на том же расстоянии от магнита, что и испытуемая гиря. При одном направлении протекающего по катушке тока  $i$  получаем отсчет по шкале  $l'_1$ , а при противоположном направлении тока  $i$  — отсчет  $l'_2$ .

На основании данных опыта магнитный момент гири

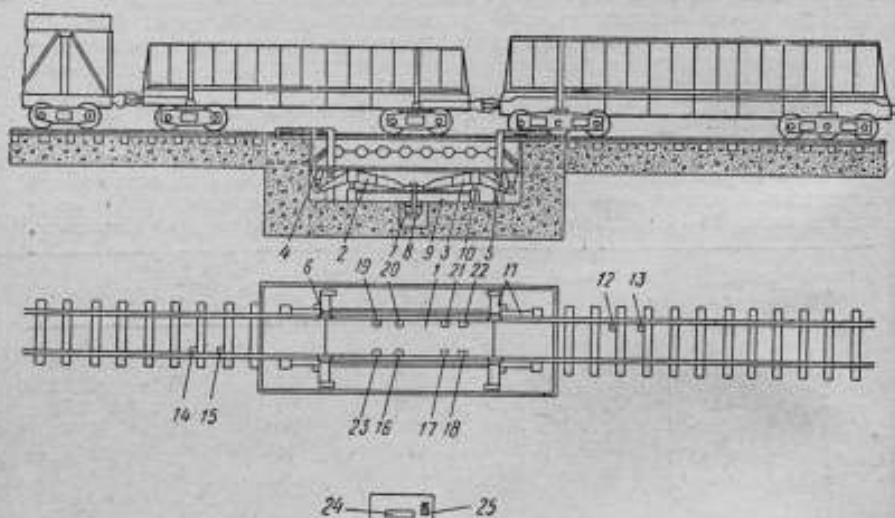
$$M_g = \frac{M_k (l_1 - l_2)}{l'_1 - l'_2}$$

Поступила в редакцию 20/XII 1970 г.

## СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ВЗВЕШИВАНИЯ ВАГОНОВ В ДВИЖЕНИИ

Наиболее распространенными в настоящее время вагонными весами являются стационарные равноплечные многорычажные коромысловые или циферблатные весы. Взвешивание на таких весах производится с остановкой взвешиваемого вагона.

За последние годы в СССР и за рубежом разработано несколько конструкций весов, позволяющих совместить во времени процессы взвешивания и транспортировки вагонов. С помощью таких весов взвешивание вагонов производится во время их перемещения по железнодорожным путям, уложен-



Взвешивание вагонов в составе на ходу на вибрационно-частотных весах

ным на специальные грузоприемные платформы, путем измерения силового воздействия на эти платформы. Время силового воздействия составляет доли секунды. Весы такого типа — это автоматические устройства, определяющие за короткие промежутки времени взвешивания значения постоянной составляющей силы, действующей на датчики весов, и регистрирующие результат взвешивания на бумажную ленту или бланк.

При значительном разнообразии конструкций весов можно выделить основные общие для всех узлы (см. рисунок), рассматриваемые на примере отечественных вибрационно-частотных вагонных весов:

- 1) одна или несколько грузоприемных платформ 1, по которым движется вагон при взвешивании;
- 2) силопередающие устройства 2, 3, 4, 8, 9, 10, при помощи которых вертикальные силы, действующие на платформы, передаются на датчики;
- 3) датчик 7 или система датчиков для преобразования силы в соответствующий электрический сигнал;
- 4) вторичный электронный прибор 24. В состав его входит устройство для определения значения постоянной составляющей силы, запоминающее устройство, отсчетное устройство для визуального наблюдения за результатами взвешивания;



5) печатающий аппарат 25, с помощью которого результаты взвешивания печатаются на бумажную ленту или бланк;

6) путевые управляющие устройства 12—23; с их помощью вторичный электронный прибор определяет тип проходящего по грузоприемным платформам объекта и время начала, а иногда и окончания процесса приема сигналов датчиков;

7) сигнальные светофоры для предупреждения о превышении максимально допустимой скорости движения;

8) устройства для уменьшения влияния продольных сил на весовую платформу при прокатывании вагона (переходные мостики 6, струнки II и т. п.).

Помимо указанных, в конкретные конструкции весов могут входить суммирующие, стабилизирующие и корректирующие устройства, устройства для уменьшения вертикальных сил, передаваемых через автосцепки на взвешиваемый вагон и другие.

Силопередающие устройства и датчики устанавливаются на бетонном фундаменте весов. Рельсы подходов путей на некотором расстоянии от весов также укладываются на бетонном основании для уменьшения вертикальных колебаний подвижного состава. Вторичный электронный прибор и печатающий аппарат помещаются в специальной аппаратной будке.

В настоящее время в СССР проходят испытания следующие типы автоматических весов для взвешивания вагонов в движении:

1) электронно-тензометрические весы марки 100×2ТВД5, разработанные Одесским политехническим институтом;

2) электронно-тензометрические весы марки 75×2ТВД4, разработанные Одесским политехническим институтом [1];

3) вибрационно-частотные весы марки ЭМ, разработанные Научно-исследовательским и конструкторским институтом испытательных машин, приборов и средств измерения масс (НИКИМП) [1].

Основные характеристики весов приведены в табл. 1.

Таблица 1

| Марка весов | Диапазон взвешивания, т | Тип датчика           | Количество датчиков, шт. | Скорость движения вагонов по весам при взвешивании, км/ч | Цена деления шкалы, кг | Длина грузоприемной платформы, м |
|-------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------|--|------------------------|----------------------------------|
| 100×2ТВД5   | 70—200                  | Тензорезисторный      | 4                        | 2—6  | 10                     | 7,0                              |
| 75×2ТВД4    | 70—150                  | То же                 | 4                        | 2—6  | 10                     | 4,9                              |
| ЭМ          | 70—200                  | Вибрационно-частотный | 1                        | до 10  | 10                     | 7,0                              |

Поскольку допускаемая погрешность определения массы «малоценных грузов» (уголь, железная руда, необогащенные руды цветных металлов, горючие сланцы, торф, строительные материалы и силикат—глиба) составляет  $\pm 1,0\%$ , допускаемая относительная погрешность взвешивания на рассматриваемых весах также составляет  $\pm 1,0\%$  (от массы груза в вагоне «нетто»).

Работа электронно-тензометрических весов основана на методе электрического измерения неэлектрических величин. Нагрузка, приложенная к весовой платформе, передается на тензометрические весовые датчики, вырабатывающие электрический сигнал, пропорциональный приложенной нагрузке. Сигнал датчика усиливается, измеряется прибором типа автокомпен-

сатора и в необходимой форме (двоично-десятичного кода) поступает в электромагнитный привод счетно-суммирующей машинки, которая на бумажной ленте печатает вес каждого взвешенного вагона. Кроме того, величину веса вагона можно прочесть на табло измерительного прибора в момент взвешивания вагона.

Тензометрические весы монтируются на железобетонном фундаменте. Весовая платформа весов представляет собой раму, подвешенную на четырех маятниковых подвесках. Верхняя поперечина маятниковой подвески опирается на тензорезисторный датчик. Такая установка платформы обеспечивает центральное приложение нагрузки на датчики и исключает воздействие на последний касательных сил, возникающих при прохождении вагона через весы. Продольные перемещения платформы ограничиваются натяжными струнками, а поперечные перемещения — упорами. Для плавного перехода колесной пары вагона с рельсов подходных путей на рельсы весовой платформы между ними устанавливаются переходные мостики специальной конструкции.

Тензометрический датчик состоит из упругих элементов специальной формы. На цилиндрических поверхностях упругих элементов поперек изолирующей прослойки с некоторым натягом навиты винтовые тензопреобразователи из константановой проволоки. Упругие элементы собираются вместе в объеме, а тензопреобразователи собираются в мост Уитстона. При приложении нагрузки упругие элементы испытывают деформацию изгиба. При этом внутренние цилиндрические поверхности растягиваются, а наружные — сжимаются. Все четыре плеча мостовой схемы, составленной из тензопреобразователей, в этом случае являются активными и симметрично работающими, что увеличивает напряжение разбаланса моста и делает линейной зависимость напряжения разбаланса от величины приложенной нагрузки.

Сигнал датчиков после усиления подается на диоды двухполупериодного выпрямителя и поступает на управляемый RC-фильтр нижних частот, предназначенный для «сглаживания» динамических помех и выделения постоянной составляющей сигнала. С RC-фильтра напряжение компенсируется при помощи измерительного делителя, где преобразуется в двоично-десятичный код массы первой тележки. Триггеры блока управления сохраняют код первой тележки до прихода на платформу весов второй тележки, после чего происходит компенсация суммарного сигнала. У весов марки 75×2ТВД4 автокомпенсатор выполнен на электромагнитных реле, а у весов марки 100×2ТВД5 — на полупроводниковых.

В грузоприемную часть вибрационно-частотных весов входят платформа, грузоприемные стойки, два продольных грузоприемных рычага с передаточным отношением 1 : 2, опорные стойки, нижняя рама, переходные мостики, продольные и поперечные струнки. Продольные и поперечные перемещения платформы ограничиваются натяжными струнками. Подъездные пути на длине 14,6 м располагаются на бетонной подушке.

Силовой измерительный датчик крепится к нижней раме и воспринимает нагрузку от грузоприемных рычагов через регулируемую серью. Чувствительным элементом датчика является плоская перемычка, выполненная за одно целое с упругим элементом.

Вибрационный метод измерения нагрузок основывается на использовании изменения собственной частоты колебаний перемычки, в зависимости от ее натяжения при деформации упругого элемента, от действия приложенной нагрузки. С противоположных сторон перемычки устанавливаются два поляризованных электромагнитных преобразователя: первый является возбуждателем колебаний, второй — датчиком, преобразующим механическое колебание перемычки в электрическое колебание. Сигнал с преобразователя датчика поступает в усилитель, вывод которого подключен к преобразователю возбуждателя, поддерживающему колебания перемычки с постоянной амплитудой. Таким образом, замыкается автоколебательная система, т. е. силовой измеритель является автогенератором камертонного типа, частоты колебаний которого находятся в однозначной функциональной (нелинейной) зависимости от силы, приложенной к упругому элементу.

Вторичная аппаратура производит преобразование частоты, генерируемой вибрационно-частотным датчиком, в количество импульсов, пропорциональное действующему на датчик усилию — весу вагона. Это количество импульсов регистрируется в двоично-десятичном коде на световом табло, а также выходным устройством в виде печати на бумажной ленте.

Во всех рассмотренных конструкциях весов предусмотрены: фиксация случаев выхода скорости движения вагонов при взвешивании за установленные пределы; блокировка, исключающая взвешивание локомотива; определение типа вагона, поступающего на грузоприемную платформу весов.

За рубежом первые весовые системы для взвешивания вагонов на ходу начали применяться в США в 1910 г. Весы предназначались для взвешивания одиночных вагонов на ходу и устанавливались на горках сортировочных станций. Скорость прокатывания вагонов составляла 3 км/ч, погрешность взвешивания —  $\pm 0,5\%$ .

В настоящее время весы для взвешивания вагонов на ходу, основанные на электротензометрическом методе взвешивания, нашли широкое применение. Различные конструкции таких весов выпускаются фирмами США, Англии, Канады и других стран и используются как для взвешивания одиночных вагонов на ходу, так и для взвешивания вагонов, следующих в составе поезда [2—13].

Краткая техническая характеристика весов, выпускаемых серийно, приведена в табл. 2.

Точность работы зарубежных взвешивающих систем обеспечивается:

- 1) применением прецизионных тензорезисторных датчиков силы (основная погрешность не превышает  $\pm 0,02\%$  от предельной нагрузки на датчик);
- 2) применением специальной вторичной аппаратуры, снабженной системой фильтров для подавления колебаний низкой (2,5—6 гц) и высокой частоты высокоскоростным электронным измерительным устройством, производящим до 100 000 опрашиваний за один или несколько полных циклов колебаний;
- 3) применением специальных устройств для уменьшения вертикальных сил, передающихся на взвешиваемый вагон через автосцепки;
- 4) применением устройств для динамической компенсации погрешности от неравномерности движения вагонов при взвешивании;
- 5) укладкой жестких и прямолинейных подходов путей на большом расстоянии от весовой платформы.

Остановимся кратко на методике поверки вагонных весов, предназначенных для взвешивания вагонов в составе на ходу без расцепки. Для поверки применяется метод многократного взвешивания одиночных груженых вагонов разных типов, равномерно перемещаемых локомотивом в обе стороны по весам со скоростью, близкой к предельно допустимой при взвешивании, и при скорости ветра, не превышающей 3 м/с. На весы подаются локомотив, груженный восьмиосный полувагон, груженный шестиосный полувагон и два четырехосных несоповерочных вагона типа 188-ВПВ, или же локомотива, груженный восьмиосный полувагон, шестиосный несоповерочный вагон типа 640-ВПВ и груженный четырехосный полувагон.

Локомотив с каждым из вагонов совершает многократное прокатывание по весам в обе стороны. Во время взвешивания машинист не должен регулировать скорость движения.

Действительные значения массы вагонов, используемых для поверки, определяются по результатам их однократных взвешиваний с остановкой и расцепкой на рычажных весах.

Если рычажные вагонные весы значительно удалены от весов для взвешивания вагонов в составе на ходу, действительные значения массы вагонов определяются на весах, которые поверяются следующим образом.

Используя тележки и гири на несоповерочных вагонах, устанавливают несколько значений массы, кратных 2 т. Каждой массой вагоны нагружают пять раз, а затем находят среднее показание весов и вычисляют поправку к этому показанию. Таким образом строится поправочная таблица или график для всей шкалы весов. Каждый грузовой вагон, используемый впослед-

Таблица 2

| Фирма, страна                                      | Назначение весов   | Предельная нагрузка, т | Тип датчиков     | Количество датчиков | Скорость движения вагонов, км/ч | Длина грузоплатформ, м | Цена деления шкалы, кг | Рекламная нагрузка в % от предельной нагрузки |
|--|--|------------------------|------------------|---------------------|---------------------------------|------------------------|------------------------|---|
| International Railroads Weighing Corporation (США) | Погонное взвешивание вагонов в составе на ходу, перемещаемых локомотивом | 318 (700 000 фунтов)   | Тензорезисторный | 4                   | до 10                           | 3,75                   | 10                     | $\pm 0,15$                                    |
| International Railroads Weighing Corporation (США) | Погонное взвешивание вагонов в составе на ходу, перемещаемых локомотивом | 318 (700 000 фунтов)   | То же            | 2                   | до 11                           | 1,60                   | 10                     | $\pm 0,15$                                    |
| Fairbanks Morse (США)                              | Погонное взвешивание вагонов, скатывающихся по сортировочной горке       | 159 (350 000 фунтов)   | » »              | 8                   | до 15                           | 25,0                   | 10                     | $\pm 0,2$                                     |
| Avery (Англия)                                     | То же  | 200                    | » »              | 8                   | 5 $\pm$ 1                       | 22,5                   | 100                    | $\pm 0,25$                                    |
| Canadian National Railways (Канада)                | » »  | 227 (500 000 фунтов)   | » »              | 8                   | до 24                           | 32,0                   | 4,54 (10 фунтов)       | $\pm 0,15$                                    |

ствии для проверки весов, пятькратно взвешивают по тележке с остановкой и расцепкой. Определяют средние значения массы вагона, при этом в показаниях весов вводят поправки, пользуясь таблицей или графиком.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вовченко П. И. Новые автоматические весоизмерительные приборы. Центральный институт научно-технической информации и пропаганды железнодорожного транспорта. Бюлл. техн.-эконом. информ. 1967, № 5 (103), 6 (104).
2. Новая весоизмерительная техника на зарубежных железных дорогах (обзор). Центральный институт научно-технической информации и пропаганды железнодорожного транспорта. Эксплуатационная и грузовая работа. Пассажирские перевозки. 1965, вып. 15.
3. Справочник компании «International Railroads Weighing Corporation», 1964.
4. Maiale A. J. High speed coupled in the motion weighing on the Reading Railroad. «Scale Journals», 1964, v. 50, N 8.
5. Rail wagons can be weighed without uncoupling. «International Mining Equipments», 1964, v. 15, N 11.
6. Automated Solid—State Weighing. «Coolery Engineering», 1965, v. 42, N 497.
7. Automated Solid—State Weighing. «Industrial Electronics», 1965, v. 3, N 7.
8. Report of study on weighing of freight cars, single draft, uncoupled in motion on the Canadian National Railways Electronic Scale at Montreal. Association of American Railroads Research department. Engineering Research Division. Report NER—60, august, 1965.
9. Horny J. H. B. An Electronic Rail Weighbrade. «The Monthly Reviews», 1967, v. 75, N 2.
10. Robinson A. E. Canadian National Railways Electronic Motion Weighing Scale «Scale Journals», 1964, v. 50, N 10.
11. Wessels D. W. What the Scale manufactures expects from the railroad scale man. «Scale Journals», 1966, v. 52, N 12.
12. Myers E. T. High speed coupled in the motion weighing on the Reading Railroads. «Modern Railroads», December, 1966.
13. Magee G. M. Coupled—in motion weighing. What the progress has been to date. What the aut look is for the future. «Railway Track and Structures», 1966, N 12.

Поступила в редакцию 14/VI 1970 г.

УДК 531.53

Л. К. КАЯК, С. И. ТОРОПНИ, Ю. П. ЕФРЕМОВ  
ВНИИМ

#### УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ УСКОРЕНИЯ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ С ПОМОЩЬЮ МАЯТНИКОВ

В настоящее время ускорение силы тяжести наиболее точно определяют методами наблюдений свободного падения тел в вакуумной камере.

Хотя вычисленные по внутренней сходимости отдельных результатов измерений средние квадратические отклонения достаточно малы (порядка 0,1—0,2 мгл), расхождения между средними результатами некоторых определенных выходят за пределы допускаемых значений, обусловленных случайными погрешностями. Это указывает на наличие в способах определения ускорения силы тяжести неисключенных систематических погрешностей и дает основание считать, что сравнительно хорошая сходимость отдельных



результатов определений ускорения силы тяжести, выполненных каким-либо одним методом, еще не говорит об отсутствии в них присущих данному методу систематических погрешностей. Неисключенные остатки систематических погрешностей при определении ускорения силы тяжести с необходимой для современных исследований точностью не должны превышать величин среднего квадратического отклонения результата измерений.

Более правильная оценка неисключенных остатков систематических погрешностей при абсолютном определении ускорения силы тяжести может быть получена путем сравнения результатов определений ускорения силы тяжести принципиально различными методами, например, методом наблюдения свободного падения тел и маятниковым методом. Целесообразно применение маятникового метода для абсолютных определений, так как использование современных средств измерения длины маятника и периода его колебаний дает возможность ожидать, что погрешности результата измерений с помощью маятников будут того же порядка, что и погрешности, определенные методом свободного падения.

Несмотря на то, что применение физических маятников для абсолютного определения ускорения силы тяжести имеет более чем 200-летнюю историю и теория физического маятника разработана достаточно глубоко, можно утверждать, что возможности повышения точности измерений еще не исчерпаны. Так, например, длина маятника обычно измерялась до начала гравиметрических наблюдений в горизонтальном положении на измерительных приборах. Погрешности таких измерений ввиду сложности конструкции маятника могли достигать значительной величины. В настоящее время этих погрешностей можно избежать. При определении ускорения силы тяжести с помощью маятников

$$g = \pi^2 \frac{L}{T^2},$$

где  $L$  и  $T$  — приведенная длина и период колебания маятника.

Для того чтобы определить значение  $g$  с погрешностью  $\pm 0,1$  мгал, приведенная длина маятника должна быть известна с относительной погрешностью  $\pm 10^{-7}$ , а период колебания должен быть измерен с относительной погрешностью  $\pm 5 \cdot 10^{-8}$ .

Приведенная длина маятника в рабочем состоянии при вертикальном его положении будет отличаться от значений при измерении длины маятника в горизонтальном положении вследствие прогиба опорной подушки под лезвием призмы, удлинения стержня маятника, находящегося в вертикальном положении, под действием собственного веса и веса груза, закрепленного на одном из концов стержня, и вследствие удлинения тел в вакууме относительно их длины в воздухе.

Влияние этих погрешностей учитывалось введением специальных поправок, вычисляемых с учетом геометрических размеров, веса и упругих свойств материала маятника. Погрешности этих поправок сопоставимы по величине с допускаемой в настоящее время погрешностью определения ускорения силы тяжести. Большие по величине неисключенные систематические погрешности при определении ускорения силы тяжести с помощью маятников могут быть вызваны влиянием системы нож—опора, поскольку обычный поворотный маятник имеет две различные системы нож—опора, у которых величина и характер упругих сил и сил трения могут быть различны.

На основании изложенного выше приходим к выводу о необходимости усовершенствовать конструкцию поворотного маятника таким образом, чтобы его приведенную длину можно было измерять в вакуумной камере абсолютным интерференционным методом как ступенчатую концевую меру в рабочем положении маятника. Следовательно, повышение точности, а главное достоверности результатов измерения приведенной длины поворотного маятника возможно, если будет создан специальный интерферометр для измерения длины маятника в рабочем положении в вакуумной камере.

На рис. 1 представлен один из вариантов усовершенствованной конструкции поворотного маятника, в котором форма опорных подушек маятника образует ступенчатую концевую меру длины. Плоскопараллельные пластины (подушки), притираемые к торцам маятника, имеют по три выступа: один — с одной стороны и два — с другой. Пластины (подушки) притираются к торцам стержня маятника так, чтобы против стороны с одним выступом на одной пластине были два выступа на противоположной пластине. Плоскости этих пластин являются измерительными поверхностями маятника. Груз, служащий для смещения центра тяжести маятника к одному из его концов, не должен экранировать ход лучей между выступами пластин. На рис. 2, а, б приведена схема интерферометра вертикального и горизонтального для измерения длины маятника в рабочем положении. Подвижные зеркала интерферометра 5 и 10 расположены на общей каретке Г-образной вакуумной камеры.

Вертикальный интерферометр — двухлучевой типа Майкельсона — служит для установки подвижного зеркала в два положения, при которых наблюдается ахроматическая полоса в системе интерференционных полос в белом свете. Белый свет источника 1 через конденсор 2 попадает в коллиматор 3 и далее на светоделительный блок 4. Часть светового потока направляется на зеркало 5, другая часть — на поверхность маятника 7. Интерференционная картина в белом свете рассматривается с помощью зрительной трубы 6. Интерференционные полосы будут наблюдаться только при двух положениях зеркала 5, когда расстояние от светоделительного слоя 4 до зеркала 5 равно расстоянию от того же слоя либо до верхней либо до нижней измерительной поверхности маятника. Перемещение зеркала 5 из положения I во II, при которых в центре поля зрения 7 видна ахроматическая полоса, измеряется с помощью горизонтального лазерного интерферометра с реверсивным счетчиком интерференционных полос.

Пучок света стабилизированного гелий-неонового лазера 9, пройдя коллиматор, увеличивающий диаметр пучка света до 6—10 мм, попадает на полупрозрачное зеркало 10, которое направляет часть света на триздр 11 и пропускает часть света на второе полупрозрачное зеркало 13, на которое также падает свет, отраженный триздром 8. На фоточувствительные приставки 12 и 14 падает свет от двух интерференционных картин так, что их сигналы сдвинуты по фазе на  $\lambda/2$ .

Реверсивный счетчик интерференционных полос с фотоприставками 12 и 14 на схеме не показан. Кроме счета целых порядков интерференции, прибор должен быть снабжен указателем дробной части. Подвижные зеркала 5 и 10 горизонтального и вертикального интерферометров могут перемещаться на расстояние до 1 м.

Если отклонение от плоскопараллельности торцевых поверхностей стержней маятника не будет превышать  $\pm 0,2$  мкм, то можно ожидать, что предельная погрешность измерения приведенной длины поворотного маятника интерференционным методом в рабочем состоянии не будет превышать значения  $\pm 0,15$  мкм.

При абсолютном определении ускорения силы тяжести с помощью поворотных маятников наибольшие по своей величине неисключенные систематические погрешности возникают из-за несовершенства системы нож—опора. В работе [1] показано, что проблема исключения адияния системы нож—опора, а также некоторых других источников равновеликих систематических погрешностей может быть решена с помощью дифференциального физического маятника с одной опорной призмой, колеблющейся на одной и той же

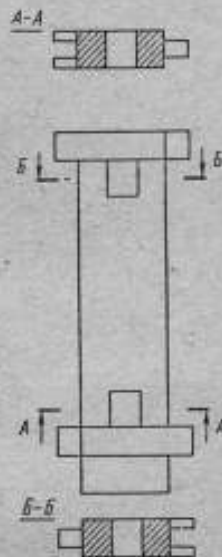


Рис. 1. Поворотный маятник

опорной подушке. В этом случае можно также заменить опорную призму на систему подвески маятника, состоящую из одной или нескольких тонких плоских пружин, так как неопределенность положения оси колебания маятника при определении разности приведенных длин исключается.

Однако измерение разности приведенных длин маятника [1] сопряжено со значительными трудностями. Так, если маятник находится в рабочем по-

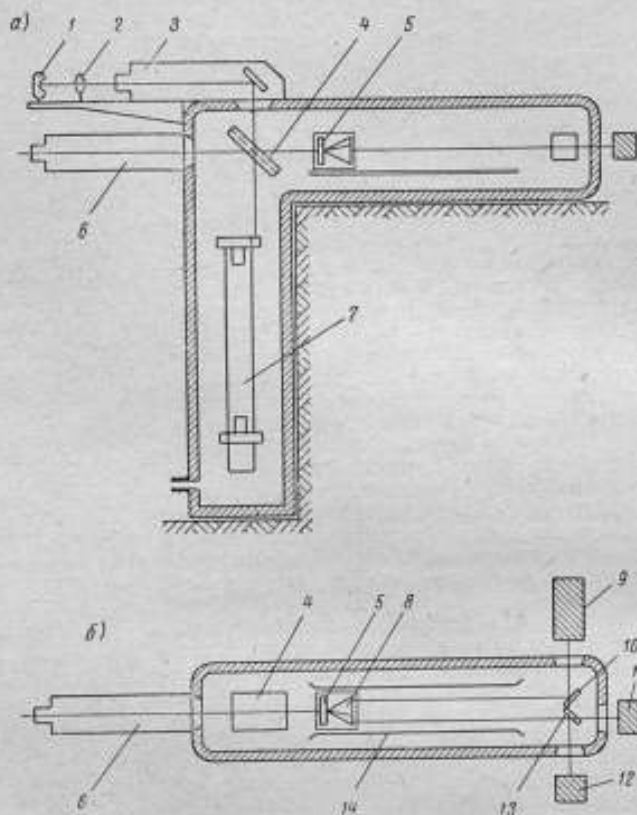


Рис. 2. Схема интерферометра для измерения длины маятника в рабочем положении

ложении, интерференционные измерения практически невозможны. С целью устранения этого недостатка и повышения точности измерений ускорения силы тяжести предлагается усовершенствованная конструкция дифференциального физического маятника (рис. 3).

Он состоит из двойного стержня 1, на нижнем конце которого жестко закреплен груз 2, а на верхнем — пластина 5, муфты 3 с двумя отверстиями, через которые проходят стержни 1; в нижней части муфты 3 закреплена опорная призма 4. Предлагаемый маятник можно рассматривать как систему, состоящую из двух тел: одно — это муфта 3, а второе тело, рассматриваемое как одно целое, — стержни 1, груз 2 и пластина 5.

Введем обозначения:

$m_1$  — масса стержней 1 с массой груза 2;

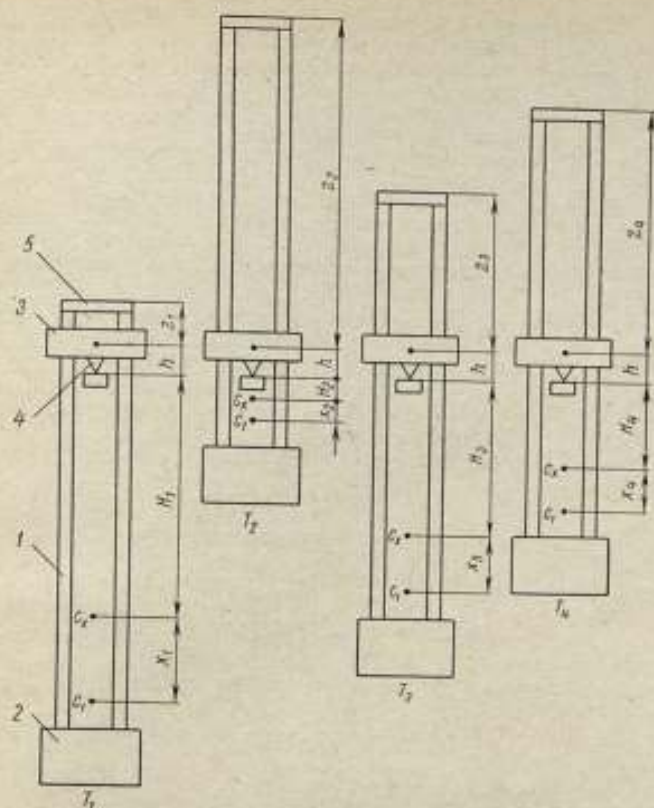


Рис. 3. Дифференциальный физический маятник

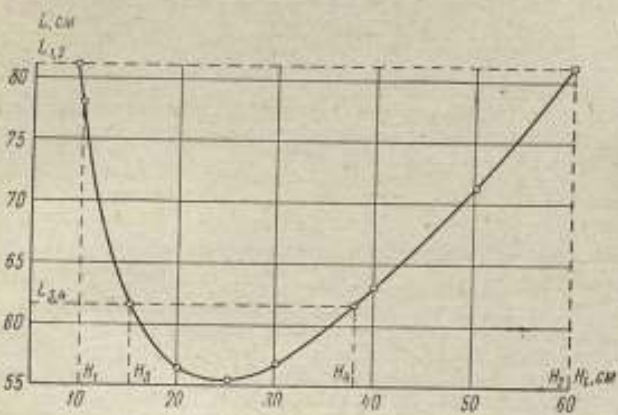


Рис. 4. Изменение приведенной длины маятника в зависимости от расстояния центра тяжести до его оси колебания



- $M = m_1 + m_2$  — масса муфты 3;  
 $c_1$  — общий центр тяжести стержней 1 с пластиной 5 и груза 2;  
 $c_2$  — центр тяжести муфты 3;  
 $c_x$  — центр тяжести маятника;  
 $H_1$  — расстояние от центра тяжести маятника  $c_x$  до его оси колебания;  
 $x_l$  — расстояние между центром тяжести  $c_1$  и  $c_x$ ;  
 $h$  — расстояние от центра тяжести муфты  $c_2$  до оси колебания маятника;  
 $z_l$  — расстояние от верхней плоскости пластины 5 до центра тяжести муфты  $c_2$ ;  
 $J_1^0$  — момент инерции стержней 1 с пластиной 5 и грузом 2 относительно оси, проходящей через центр тяжести  $c_1$  параллельно оси колебания маятника;  
 $J_2^0$  — момент инерции муфты 3 относительно оси, проходящей через ее центр тяжести  $c_2$  параллельно оси колебания маятника.

Момент инерции маятника относительно оси колебания

$$J = J_1^0 + J_2^0 + m_2 h^2 + m_1 (x_l + H_1). \quad (1)$$

Если  $c_x$  — центр тяжести, то справедливо равенство

$$m_1 x_l = m_2 (H_1 + h), \quad (2)$$

откуда

$$x_l = \frac{m_2}{m_1} (H_1 + h). \quad (3)$$

После подстановки в (1) значения  $x_l$  из (3) получим

$$J = A + \frac{(MH_1 + m_2 h)^2}{m_1}, \quad (4)$$

где  $A = J_1^0 + J_2^0 + m_2 h^2$ .

Как известно, период колебания физического маятника при малых амплитудах колебания

$$T = \pi \sqrt{\frac{J}{MgH_1}}, \quad (5)$$

где  $g$  — ускорение силы тяжести.

Согласно (4) и (5), приведенная длина физического маятника, равная длине математического маятника, имеющего такой же период колебания, будет равна

$$L_i = \frac{J}{MH_i} = \frac{1}{MH_i} \left[ A + \frac{(MH_i + m_2 h)^2}{m_1} \right]. \quad (6)$$

Из выражения (6) следует, что приведенная длина маятника зависит от его основных параметров  $M$ ,  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $J_1^0$ ,  $J_2^0$ ,  $h$  и является функцией расстояния  $H_i$ . На рис. 4 представлен график изменения приведенной длины маятника  $L_i$  в зависимости от изменения расстояния центра тяжести маятника до его оси колебания  $H$ . Как видно, одной и той же приведенной длине маятника  $L_i$  соответствуют два значения  $H_i$ , при этом в маятнике можно выбрать бесчисленное множество пар значений  $H_i$ , которым будут соответствовать различные приведенные длины маятника  $L_i$ . Поэтому в одном и том же дифференциальном физическом маятнике всегда можно выбрать две пары взаимных точек  $(H_1, H_2)$  и  $(H_3, H_4)$ , которым будут соответствовать при-



веденные длины маятника  $L_{1,2}$  и  $L_{3,4}$  и соответственно периоды колебания  $T_{1,2}$  и  $T_{3,4}$ .

Согласно изложенному выше для взаимных точек  $H_1$  и  $H_2$  в соответствии с выражениями (5) и (6) будем иметь

$$\frac{g}{\pi^2} T_{1,2}^2 = \frac{M}{m_1} \left( H_1 + H_2 + 2 \frac{m_2}{M} h \right), \quad (7)$$

где  $T_{1,2}^2 = \frac{T_1^2 H_1 - T_2^2 H_2}{H_1 - H_2}$ ;  $T_1$  — период колебания маятника, когда его центр тяжести  $c_x$  находится на расстоянии  $H_1$  от оси колебания маятника;  $T_2$  — период колебания маятника, когда его центр тяжести  $c_x$  находится на расстоянии  $H_2$  от оси колебания.

Аналогичным образом для другой пары взаимных точек ( $H_3$  и  $H_4$ ) будем иметь

$$\frac{g}{\pi^2} T_{3,4}^2 = \frac{M}{m_1} \left( H_3 + H_4 + 2 \frac{m_2}{M} h \right). \quad (8)$$

Из равенств (7) и (8) получим

$$\frac{g}{\pi^2} (T_{1,2}^2 - T_{3,4}^2) = \frac{M}{m_1} [(H_1 - H_3) + (H_2 - H_4)]. \quad (9)$$

Для маятника при любых перемещениях стержней (см. рис. 3) относительно муфты 3 будут иметь место равенства

$$x_i + H_i + Z_i + h = \text{const}; \quad (10)$$

$$x_i = \frac{m_2}{m_1} (H_i + h).$$

Из выражения (9) с учетом (10) получим

$$g = \pi^2 \frac{(z_3 - z_1) + (z_2 - z_4)}{T_{1,2}^2 - T_{3,4}^2}. \quad (11)$$

Из равенства (11) следует, что значение ускорения силы тяжести  $g$  может быть определено с помощью нового дифференциального маятника по измеренным значениям  $z_1, z_2, z_3, z_4$  перемещений стержней 1 относительно муфты 3 и периодам колебаний маятника  $T_1, T_2, T_3, T_4$ . На рис. 3 в первом положении маятник имеет расстояние от центра тяжести до оси колебания  $H_1$  и период колебания  $T_1$ . Измерив период колебания маятника  $T_1$  и затем расстояние  $z_1$  от пластины 5 до муфты 3, передвигают стержни 1 в муфте 3 вверх так, чтобы расстояние от центра тяжести до оси колебания было равно  $H_2$ . Это контролируется по равенству периодов колебания маятника  $T_2$  и  $T_1$ . После измерения периода колебания маятника  $T_2$  необходимо измерить расстояние  $z_2$ .

Далее производится перемещение стержней 1 относительно муфты 3 так, чтобы расстояние от центра тяжести маятника до его оси колебания было равно  $H_3$ . Измерив период колебания маятника  $T_3$  и расстояние  $z_3$ , стержни 1 передвигают относительно муфты 3 до тех пор, пока расстояние от центра тяжести маятника до его оси колебания будет равно  $H_4$ . Затем измеряют период колебания маятника  $T_4$  и расстояние  $z_4$ . При повторных измерениях с маятником стержни 1 маятника относительно муфты 3 могут быть установлены достаточно точно с помощью микроскопа с окулярным микрометром по шкале, нанесенной на стержнях 1. Ввиду того, что пластина 5 и муфта 3 при перемещении стержней 1 представляют ступенчатую концевую меру длины, расстояния  $z_1, z_2, z_3, z_4$  с высокой точностью могут быть измерены в вакууме и в рабочем положении маятника с помощью интерферометра.

В новом маятниковом приборе интерферометр должен быть размещен в той же вакуумной камере, в которой будут производиться наблюдения с маятниками.

В заключение отметим, что применение дифференциального физического маятника с одной системой нож—опора для абсолютных определений ускорения силы тяжести позволяет исключить влияние многих систематических погрешностей, присущих маятниковому методу, без введения соответствующих поправок. Очевидно, что результаты измерений ускорения силы тяжести с помощью дифференциального физического маятника при использовании современных средств измерения длины и периода колебаний будут в несколько раз точнее результатов прежних определений маятниковым методом.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Т о р о п и н С. И. Дифференциальный физический маятник с одной системой призма—подушка. Труды ВНИИМ, вып. 23, Машгиз, 1954.

Поступила в редакцию 18/XII 1970 г.

УДК 681.264.089.6

С. М. АГЕЕВ  
ВНИИМ

## О ПОВЕРКЕ ВАГОННЫХ ВЕСОВ

Для учета промышленной и сельскохозяйственной продукции, перевозимой железнодорожным транспортом, широко применяются вагонные весы. В связи с ростом объема перевозок увеличивается с каждым годом и количество вагонных весов, используемых на железных дорогах.

В эксплуатации еще встречаются вагонные весы старых типов, такие как двойные весы типа ВВ, служащие для взвешивания двухосных и четырехосных вагонов. Особенность конструкции этих весов состоит в том, что главные грузоприемные рычаги в них подвешены к опорным стойкам на плоских серьгах, а платформы жестко опираются на призмы грузоприемных рычагов, вследствие чего обе платформы имеют свободное поперечное колебание и весьма ограниченные продольные колебания; это является серьезным недостатком весов данного типа.

Применяются также и двойные вагонные весы типа ВПП, в которых каждая платформа опирается на две пары грузоприемных рычагов. Необходимое поперечное и продольное качание платформ обеспечивается благодаря особому устройству грузоприемного узла. Весы типа ВВ и ВПП рассчитаны для предельных нагрузок не выше 100 т.

В связи с ростом грузоподъемности железнодорожных вагонов (в эксплуатации появились шестiosные и даже восьмиосные вагоны) потребовались вагонные весы с большей предельной нагрузкой. В ГОСТ 9020—64 «Весы вагонные» предусмотрено изготовление вагонных весов с предельной нагрузкой свыше 100 т, например на 150 и 200 т, которые изготавливаются с коромысловым шкальным отсчетным устройством типа ВК и вагонные весы с циферблатным указателем типа ВЦ. Различие между этими весами состоит в том, что у вагонных весов типа ВЦ коромысловое отсчетное устройство заменено циферблатным указателем и введен дополнительно промежуточный механизм для уменьшения усилия, передаваемого на циферблатный указатель, поскольку усилие на входе указателя не должно превышать 10 кг.

Преимущество вагонных весов типа ВК и ВЦ по сравнению с весами ВВ и ВПП заключается в том, что они имеют одну платформу, которая опирается только на две пары грузоприемных рычагов, а шарнирная подвеска платформы обеспечивает ее продольные и поперечные колебания. Монтаж таких весов более прост, а сами весы более удобны в эксплуатации.

С внедрением весов, имеющих циферблатные указатели, становится возможным осуществление дистанционной передачи показаний и автомати-

зация процесса взвешивания. Однако весы с циферблатным указателем имеют существенный недостаток: отсчетное устройство этих весов конструктивно сложнее, чем у шкальных весов из-за необходимости введения промежуточного механизма для уменьшения усилия, передаваемого на циферблатный указатель.

Весы с циферблатным указателем изготовляют со ступенчатым пределом взвешивания, когда уравновешивание нагрузки, превосходящей верхний предел первого диапазона по шкале циферблата, производится за счет механического наложения накладных гирь на основной рычаг (коромысло) промежуточного механизма. Вследствие этого стрелка циферблатного указателя может совершать не один, а два и более оборотов и тем самым расширяется диапазон взвешивания при сохранении цены деления одинаковой с подобными весами, имеющими коромысловое отсчетное устройство.

Точность взвешивания на вагонных весах зависит от:

1) совершенства конструкции весов (достаточная жесткость рам помостов, наличие опор средних секций помостов, совершенства системы подвески грузоприемных узлов и т. д.);

2) качества изготовления и монтажа весов;

3) состояния рельсовых путей на подъездных путях и на помостах весов;

4) правильности организации наблюдения за весовым хозяйством;

5) надежности методов и средств проверки вагонных весов.

Несмотря на то, что появились весы большой грузоподъемности (до 200 т) и весы новых конструкций с циферблатной головкой, методика и средства проверки вагонных весов до 1963 г. практически не изменились. С середины 1963 г. в нашей стране для проверки вагонных весов начали применять новые средства — весоповерочные вагоны грузоподъемностью 82 т, а два года назад — весоповерочные вагоны грузоподъемностью около 120 т. Однако такими весоповерочными вагонами, в особенности грузоподъемностью до 120 т, до настоящего времени оснащены всего лишь около 40% всех железных дорог страны. Поэтому при проверке вагонных весов большой грузоподъемности зачастую приходится использовать старые методы и средства проверки, т. е. контрольно-весовые платформы до 25 т. Такой метод проверки ненадежен, так как в этом случае не известны погрешности весов при нагрузках свыше 25 т. В то же время при больших нагрузках возникают деформации рычажного механизма весов и фундамента, которые приводят к изменению передаточного отношения плеч рычагов, а следовательно, и к увеличению погрешности взвешивания с увеличением нагрузки на весы.

Поверочной лабораторией ВНИИМ была проведена проверка вагонных весов предельной нагрузки до 100 т с помощью контрольно-весовой платформы до 25 т; при проверке значения неопределенности показаний весов дежали в пределах 0,1% от взвешиваемой нагрузки, а разброс результатов взвешивания одного и того же вагона на различных весах достигал 0,5% от величины взвешиваемого груза. Это указывает на наличие невыявленных при проверке весов систематических погрешностей. Только внедрение новых методов и средств, позволяющих производить проверку весов при нагрузках, близких к предельной, сможет обеспечить надежную проверку большегрузных вагонных весов. Метод проверки вагонных весов с помощью весоповерочного вагона позволяет:

1) определить чувствительность и правильность показаний весов при нагрузках 10, 25, 50 и 100% от предельной нагрузки;

2) проверить передаточные отношения плеч каждой пары грузоприемных рычагов, а при необходимости — передаточное отношение плеч каждого грузоприемного рычага в отдельности, так как в весоповерочном вагоне имеется грузовая тележка специальной конструкции с базовым расстоянием 1 м;

3) при проверке вагонных весов со ступенчатым пределом взвешивания убедиться в правильности показаний весов в переходных точках шкалы циферблатного указателя, а именно: в соблюдении соответствия установки стрелки циферблатного указателя на последнем делении шкалы первого оборота с установкой ее на нулевом делении второго оборота при переходе

при взвешивании с первого оборота шкалы на второй или при переходе со второго оборота шкалы на третий и т. д.;

4) установить независимость показаний весов от положения нагрузки на платформе и влияние наклона вагона на показания весов при нагрузках, близких к предельной;

5) значительно сократить время поверки вагонных весов за счет механизации разгрузки, погрузки и перемещения по платформе грузовой тележки с образцовыми гирями.

Наличие весоповерочного вагона в ведении ремонтных баз железных дорог позволяет при ремонте вагонных весов осуществлять качественную их юстировку.

Весовой поверочной лабораторией ВНИИМ была произведена поверка нескольких вагонных весов, отъюстированных после ремонта с применением контрольно-весовой платформы и весоповерочного вагона. Результаты последующей поверки показали, что иногда вагонные весы, отъюстированные с помощью контрольно-весовой платформы, при поверке весоповерочным вагоном не удовлетворяли установленным нормам; вагонные весы, отъюстированные с помощью весоповерочного вагона, при поверке всегда соответствовали установленным нормам. Это еще раз подтверждает преимущество нового метода поверки вагонных весов.

В 1967 г. введен в действие ГОСТ 11925—66, регламентирующий методы поверки вагонных весов. В нем имеется ряд недостатков, снижающих его ценность, например не указана широко применяемая в настоящее время поверка весов с помощью контрольно-весовых платформ, поверка переходных точек шкалы циферблатного указателя со ступенчатым пределом взвешивания и не дана методика поверки циферблатных весов с предельной нагрузкой 200 т. С целью устранения указанных недостатков его следует пересмотреть.

Кроме того, должен быть решен вопрос о создании весоповерочного вагона для поверки вагонных весов грузоподъемностью 150, 200 т и выше. При этом также необходимо разработать средства для поверки гирь, которыми оснащается весоповерочный вагон. В настоящее время такие поверочные средства имеются лишь в Москве и Одессе; этого недостаточно, так как транспортировка весоповерочных вагонов удлиняет сроки поверки, удорожает поверку и загружает железнодорожный транспорт нецелесообразными перевозками. Существующая практика поверки образцовых гирь весоповерочных вагонов на неравноплечих передвижных весах не обеспечивает необходимую точность поверки.

В заключение следует отметить, что неравноплечие многорычажные коромысловые и циферблатные весы не позволяют производить взвешивание вагонов на ходу без расцепки. В некоторой степени использованию автоматических весов препятствовало то обстоятельство, что на все грузы, независимо от их ценности, была установлена единая норма точности — 0,1% от взвешиваемой нагрузки. В настоящее время разработаны дифференцированные нормы точности взвешивания — 0,1—1% в зависимости от ценности взвешиваемого груза; это будет способствовать скорейшему внедрению новых конструкций весов, позволяющих взвешивать вагоны на ходу без расцепки.

Поступила в редакцию 17/IV 1970 г.

УДК 681.267.3.089.6

С. М. АГЕЕВ  
ВНИИМ

### ПОВЕРКА БОЛЬШЕГРУЗНЫХ БУНКЕРНЫХ ВЕСОВ

ГОСТ 14018—68 «Весы элеваторные (бункерные), рычажные. Методы и средства поверки» предусматривает поверку бункерных весов методом тарирования при нагрузке, соответствующей 40% от верхнего предела взвешивания.



Применение такого метода связано с конструктивными особенностями весов, которые не позволяют применить дополнительные приспособления, обеспечивающие поверку весов методом непосредственного нагружения. Ограничение поверки весов до нагрузки, соответствующей 40% от верхнего предела взвешивания, вызвано необходимостью сокращения количества тарирований, так как вносимая в результат поверки погрешность зависит от количества тарирований, т. е.  $\Delta = 0,45 \sqrt{k} \varepsilon_{\text{доп}}$ , где  $k$  — число тарирования;  $\varepsilon_{\text{доп}}$  — допускаемая погрешность весов.

Весовой поверочной лабораторией ВНИИМ разработана и внедрена новая методика поверки большегрузных бункерных весов до 70 т с коромысловым отсчетным устройством, в которой предусмотрено лишь одно тарирование для определения всех метрологических характеристик весов.

Для проведения поверки новым методом, кроме поверочных средств, предусмотренных ГОСТ 14018—68, необходимо дополнительное приспособление, предложенное Кревером для поверки шкальных автомобильных весов. Оно состоит из специальной призмы, неподвижно укрепляемой на коромысле, и навешиваемой на нее серьги с чашей. Кроме того, помимо граммового и миллиграммового наборов образцовых гирь 4-го разряда, необходимы также же наборы образцовых гирь 3-го разряда.

Поверка весов по новой методике выполняется в такой последовательности.

1. На станке производится поверка коромысла в соответствии с ГОСТ 14018—68.

2. Перед поверкой собранных весов на правый конец коромысла (вблизи подвижного указателя) укрепляется приспособление Кревера. Весы тарируются (приводятся в состояние равновесия) и определяются метрологические характеристики ненагруженных весов — устойчивость, чувствительность и непостоянство показаний, как предусмотрено в ГОСТ 14018—68. Затем весы нагружаются образцовыми гирями 4-го разряда массой по 20 кг; при этом убеждаются в правильности нанесения нарезных делений основной шкалы коромысла до деления, соответствующего 1/10 от предельной нагрузки весов. При этой же нагрузке поверяется и гирька дополнительной шкалы коромысла.

3. Не снимая образцовые гири с грузоприемного устройства весов, устанавливают большую передвижную гирю (карытку) на нулевое деление, а коромысло весов приводят в состояние равновесия с помощью образцовых гирь 3-го разряда, помещаемых на чашу приспособления Кревера. Если масса этих гирь  $m$ , то масса гирь, соответствующая одному делению шкалы (цена деления),  $m_1 = \frac{m}{n}$ , где  $n$  — число нарезных делений на коромысле в интервале от нуля до 1/10 от наибольшего предела взвешивания.

4. Массу гирь, соответствующую одному делению шкалы, определяют еще раз, но другим способом. Для этого на грузоприемное устройство весов добавляют образцовые гири 4-го разряда в количестве, равном значению одного деления шкального коромысла  $q$  и уравновешивают коромысло весов с помощью образцовых гирь 3-го разряда  $m_2$ , помещаемых на чашу приспособления Кревера. Если весы обладают достаточным постоянством показаний, а нарезные деления нанесены верно, то значения  $m_1$  и  $m_2$  будут близкими.

5. После этого снимают образцовые гири с грузоприемного устройства и с чаши приспособления Кревера. В бункер весов загружают балласт (груз, который взвешивается на данных весах), масса которого должна составлять не менее 75—80% от наибольшего предела взвешивания. С помощью передвижных гирь (большой и малой) весы уравновешивают и определяют фактическую массу груза  $M_f$ , помещенного в бункер весов.

6. Массу этого же груза  $M_1$  определяют путем уравновешивания его с помощью образцовых гирь 3-го разряда, помещаемых на чашу приспособления Кревера.

7. Далее, не меняя нагрузки, на грузоприемное устройство весов добавляют образцовые гири 4-го разряда в количестве, равном значению одного



деления шкального коромысла, и уравновешивают коромысло образцовыми гирями 3-го разряда  $m_3$ , помещаемыми на чашу приспособления Кревера. Если весы обладают достаточной устойчивостью, постоянством показаний и нарезные деления нанесены верно, то должно соблюдаться равенство  $m_1 \approx m_2 \approx m_3$ .

Расхождения между полученными значениями должны быть только в первом десятичном знаке. Из трех найденных значений находят среднее

$$m_{\text{ср}} = \frac{m_1 + m_2 + m_3}{3}$$

Эта величина определяется до второго десятичного знака.

Зная  $m_{\text{ср}}$ , можно рассчитать значение массы груза, находящегося в бункере весов,

$$M_p = \frac{M_1}{m_{\text{ср}}} q, \text{ кг}$$

Погрешность весов определяют как разность между измеренным (фактическим) значением массы груза и его расчетным значением, т. е.  $\Delta = M_{\text{ф}} - M$ .

Величина этой погрешности не должна превышать значения, регламентируемого ГОСТ 14018—68.

Неоднократная поверка бункерных весов с предельной нагрузкой 70 т как методом тарирования, так и данным методом, подтвердила правильность предложенной нами методики.

Время, затраченное на поверку элеваторных весов новым методом, сократилось в два раза по сравнению с методом рекомендуемым ГОСТ 1408—68.

Поступила в редакцию 20/IV 1970 г.

УДК 681.261.2.(083.75)

М. И. ТЮТКОВА  
в.н.и.м.

### НОВЫЕ СТАНДАРТЫ НА ЛАБОРАТОРНЫЕ ВЕСЫ И ГИРИ

В метрической системе мер за единицу массы принят килограмм. Первичным эталоном единицы массы в СССР является государственный эталон килограмма. Порядок передачи размера единицы массы килограмма от государственного эталона килограмма рабочим эталонам, образцовым и рабочим мерам устанавливает ГОСТ 14636—69 «Поверочная схема для гирь и весов». В этом стандарте регламентированы погрешности весов и гирь, применяемых в СССР, а также сформулированы основные требования хранения и поверки эталонов, образцовых и рабочих гирь; ГОСТ согласован с рекомендацией РС 2260—69 «Поверочная схема для гирь и весов», разработанной по линии СЭВ.

В СССР основным стандартом на гири общего применения является ГОСТ 7328—65 «Гири общего назначения», в котором все гири в зависимости от точности подразделены на пять классов. Допускаемые отклонения массы гирь от их номинального значения установлены такими, что каждый класс гирь в своей области можно применять без учета поправок на гири, т. е. по номинальной массе; это очень удобно. В результате потребовалось значительно уменьшить погрешности гирь всех классов и прежде всего наиболее точных — гирь 1- и 2-го классов.

Гири, соответствующих по точности гирям 1-го класса, ранее не существовало; к гирям 2-го класса по точности ближе всего подходят аналитические гири, к гирям 3-го класса — бывшие технические гири 1-го класса, к гирям 4-го класса — бывшие технические гири 2-го класса и к гирям 5-го класса — торговые гири.

В настоящее время отечественная промышленность выпускает гири общего назначения только по ГОСТ 7328—65. С введенным в действие ГОСТ 7328—65 были пересмотрены все нормативные документы как на выпуск весов и гирь, так и на методы их поверки. Существовавшие образцовые гири уже не соответствовали по точности предъявляемым к ним требованиям и не обеспечивали нужную точность поверки рабочих гирь. Поэтому был разработан новый ГОСТ 12656—67 «Гири образцовые», в котором все образцовые гири подразделены на четыре разряда. Точностные характеристики образцовых гирь были установлены такими же, что и у гирь соответствующих классов. Например, образцовые гири 1-го разряда имеют те же точностные характеристики, что и гири 1-го класса и т. д.

Различие между образцовыми и рабочими гирями заключается в их назначении: рабочие гири применяются для взвешиваний в любых областях народного хозяйства, а образцовые — служат для поддержания единства измерений в области измерений массы и применяются только для поверочных работ. На образцовых гирях всех разрядов дополнительно к установленным ГОСТ 7328—65 обозначениям наносят порядковый номер набора.

ГОСТ 11711—66 «Гири условные» устанавливает требования на гири с условной массой от 500 г до 10 кг, предназначенные для взвешивания на неравноплечих гирных весах с отношением плеч рычажной системы 1 : 100.

Методы и средства поверки образцовых, рабочих и условных гирь изложены в ГОСТ 13703—68 и ГОСТ 14269—69. Поскольку точностные характеристики образцовых и рабочих гирь одинаковы, то одинаковы и методы их поверки.

В связи с повышением точности гирь усложнились и методы их поверки. Так, образцовые гири 1-го разряда и гири 1-го класса допускается поверять только методом калибрования, причем измерения производятся дважды двумя наблюдателями. Таким же методом рекомендуется поверять образцовые гири 2-го разряда и гири 2-го класса. Гири 2-го класса, кроме того, разрешается поверять методом сличений — путем двоянных двукратных измерений.

Образцовые гири 3-го разряда и гири 3-го класса можно поверять по методу Д. И. Менделеева. Допускается определение массы гирь производить один раз, но при этом необходима дополнительная контрольная поверка. Массу образцовых гирь 4-го разряда и гирь 4- и 5-го классов определяют один раз без учета поправок образцовых гирь, по которым производится поверка. Массу условных гирь также определяют один раз, но поправки образцовых гирь 4-го разряда, по которым поверяют условные гири, следует учитывать.

ГОСТ 13703—68 «Гири образцовые 2—4-го разрядов, гири 2—5-го классов, гири-рейтеры 2- и 3-го классов и гири условные. Методы и средства поверки» введен в действие с 1 июля 1969 г. В части образцовых гирь 2-го разряда и гирь 2-го класса срок введения этого стандарта перенесен на 1 июля 1971 г. Однако уже в настоящее время все образцовые гири 2-го разряда и гири 2-го класса, находящиеся в обращении, выпускаемые промышленностью и после ремонта, следует поверять в соответствии с ГОСТ 13703—68. Для поверки этих гирь наряду с образцовыми гирями 1-го разряда можно использовать образцовые граммовые гири 2-го разряда и гири 2-го класса Г-2-1110 и Г-2-210 из нержавеющей стали, предварительно аттестованные с точностью образцовых гирь 1-го разряда в соответствии с требованиями ГОСТ 12656—67. Для поверки миллиграммовых образцовых гирь 2-го разряда и гирь 2-го класса разрешается использовать миллиграммовые образцовые гири 2-го разряда из алюминия производства рижского завода «Эталон» (ранее называемые образцовыми гирями 1-го разряда), аттестованные с точностью образцовых гирь 1-го разряда; срок действия в свидетельстве на эти гири устанавливается шесть месяцев.

Имеющиеся в обращении аналитические гири допускались к применению до 1 июля 1971 г. Поверку их разрешалось производить в соответствии с инструкцией 63—56 по поверке рабочих гирь. Однако уже теперь часть наборов аналитических гирь целесообразно ремонтировать в соответствии

с требованиями на гири 2-го класса, а там, где это возможно, переводить их в гири 3-го класса с тем, чтобы к 1 июня 1971 г. число наборов аналитических гирь, находящихся в обращении, было минимальным. С 1 июля 1971 г. все применяемые в СССР гири должны соответствовать требованиям ГОСТ 7328—65 «Гири общего назначения» и ГОСТ 12656 «Гири образцовые», ГОСТ 11711 «Гири условные» и ГОСТ 12377—66 «Гири-рейтеры» и поверяться в соответствии с требованиями ГОСТ 13703—68 и 14269—69.

В стандартах на все гири установлены единая условная плотность материала  $8,0 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  и единая условная плотность воздуха  $1,2 \text{ кг/м}^3$ , на основе которых производится юстирование и поверка образцовых и рабочих гирь. Применение единой условной плотности материала и воздуха позволило несколько упростить и сократить время поверки гирь, так как при этом отпала необходимость введения поправки в результат взвешивания на действие аэростатических сил на сличаемые гири. Для введения этой поправки нужно знать объемы сличаемых гирь и плотность воздуха, что требует проведения дополнительных измерений и трудоемких расчетов.

Массу тел можно определять как гирами, аттестованными по действительной плотности, так и гирями, аттестованными по условной плотности материала. В последнем случае при определении поправки на действие аэростатических сил объем гирь рассчитывается по плотности  $8,0 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  независимо от того, из какого материала они изготовлены. Плотность воздуха в зависимости от точности взвешивания либо определяется, либо принимается равной  $1,2 \text{ кг/м}^3$ .

Образцовые весы, применяемые ранее для поверки гирь, также перестали отвечать возросшим требованиям на гири и уже не обеспечивали необходимую точность их поверки. В новом ГОСТ 14168—69 «Весы образцовые. Методы и средства поверки» метрологические характеристики весов приведены в соответствии с требованиями на гири по ГОСТ 7328—65 и 12656—68. Хотя наряду с обычными весами предусмотрены весы с очень высокими метрологическими характеристиками (образцовые весы 1-го разряда повышенной точности и образцовые весы 1-го разряда), методы поверки образцовых весов практически не изменились по сравнению с применяемыми ранее.

Существенному изменению подверглись стандарты на лабораторные весы. За последние десять лет промышленностью разработаны новые типы лабораторных весов — квадрантные, крутильные, рычажные двухпризмные, рычажные равноплечные со встроенными гирями на полную и неполную нагрузки и рычажные весы с именованными шкалами. Кроме того, по линии МОЗМ разработаны проекты международных рекомендаций на весы — «Метрологические характеристики на весоизмерительные приборы неавтоматического действия» и «Технические характеристики на весоизмерительные приборы неавтоматического действия». Классификация, нормы точности, пределы взвешивания, технические характеристики и т. д., устанавливаемые этими рекомендациями, были учтены при разработке стандартов СССР на весы, а именно: ГОСТ 14704—69 «Весы лабораторные. Пределы взвешивания и нормы точности», ГОСТ 15075—69 «Весы лабораторные равноплечные с оптическим отсчетом», ГОСТ 15076—69 «Весы лабораторные двухпризмные» и ГОСТ 14004—68 «Весы рычажные общего назначения. Пределы взвешивания и нормы точности».

ГОСТ 14704—69 предусматривает четыре класса лабораторных весов по числу классов гирь (5-й класс гирь применяется с рычажными весами общего назначения — с торговыми весами). В этом ГОСТ для лабораторных весов всех классов наибольшая допускаемая погрешность измерения массы устанавливается равной трем ценам делений шкалы и, следовательно, составляющие погрешности должны быть меньше. Это требование не распространяется на погрешность из-за неравноплечности коромысла для весов 1- и 2-го класса, так как для них основным методом измерения регламентирован метод точного взвешивания, при котором эта погрешность исключается из результата измерения. Погрешности встроенных в весы гирь для весов с ценой деления  $0,005 \text{ мг}$  и менее также могут быть больше трех цен делений шкалы. В этом случае должны быть указаны поправки к номинальной массе гирь.

В декабре 1970 г. утвержден ГОСТ «Весы лабораторные, рычажные, трехпризменные равноплечие и двухпризменные. Методы и средства поверки», в котором наряду с применяемыми ранее предусмотрены методы поверки лабораторных весов новых конструкций, а именно: весов с именованными шкалами и весов двухпризменных и равноплечих со встроенными гири на полную и неполную нагрузки. В весах с именованными шкалами определяется погрешность измерения массы по шкале; эта погрешность регламентируется и в стандартах. Цена деления определяется только у весов без именованных шкал.

Встроенные в весы гири во всех случаях поверяются совместно с весами. Погрешности встроенных гирь в весах со встроенными гири на неполную нагрузку измеряются без ведения протокола поверки, в весах со встроенными гири на полную нагрузку — ведение протокола поверки обязательно.

При первичной поверке весов, т. е. при поверке весов, выпускаемых промышленностью, или после их ремонта, определяются погрешности гирь в каждой декаде, при наибольшей нагрузке и при нагрузках, соответствующих наибольшему положительному или отрицательному погрешностям гирь. При повторной поверке достаточно определять погрешности гирь первой половины каждой декады (от 1 до 5), а также при наибольшей нагрузке и при нагрузках, соответствующих наибольшему положительному и отрицательному погрешностям гирь. Методы определения остальных метрологических характеристик весов не изменились по сравнению с принятыми ранее.

Поверка лабораторных квадрантных весов предусмотрена в методических указаниях № 275 (1965 г.) по поверке технических квадрантных весов типа ВТК (ВЛТК), поверка крутильных и торсионных весов — в ГОСТ 13718—68 «Весы крутильные (торсионные). Методы и средства поверки».

Для введения в действие стандартов на образцовые и лабораторные весы и гири следует не только снабдить лаборатории государственного и ведомственного надзора необходимым образцовым оборудованием, но учесть требования к помещениям для поверки точных образцовых и лабораторных весов и гирь. Эти требования указаны в ГОСТ 12656—67, ГОСТ 13703—68, ГОСТ 14168—69 и в литературе, посвященной весоизмерительным приборам и гириям.

Необходимо отметить, что в 1970 г. надян ГОСТ 15473—70 «Весы и весовые дозаторы. Термины и определения», в котором даны определения основных терминов, применяемых в области весов и весовых дозаторов. Термины, установленные этим стандартом, обязательны для применения во всей документации, учебных пособиях, технической и справочной литературе.

Поступила в редакцию 18/XII 1970 г.

УДК 531.75.089.68

И. А. СМЕРНОВА, М. Н. МОШКОВА  
ВНИИМ

### СЛИЧЕНИЕ НАЦИОНАЛЬНЫХ ПРОТОТИПОВ КИЛОГРАММА В МЕЖДУНАРОДНОМ БЮРО МЕР И ВЕСОВ

Наивысшая достижимая точность измерений массы определяется прежде всего стабильностью международного прототипа килограмма и точностью передачи единицы национальным прототипам килограмма.

Международный прототип килограмма хранится и применяется в Международном бюро мер и весов; там же осуществляется передача размера единицы национальным прототипам килограмма, которые являются основой измерения массы в отдельных странах.

Со времени создания международного килограмма и большинства национальных прототипов килограмма (1883 г.) и первого их исследования и аттестации (1886—1888 гг.) прошло более семидесяти лет. За это время в Международном бюро мер и весов были проведены две периодические поверки



эталон-свидетелей международного прототипа килограмма и национальных прототипов килограмма. Кроме того, произведены большие работы по усовершенствованию группы эталон-свидетелей, методики сличений эталонов и очистки их поверхности, а также исследование и усовершенствование весов, применяемых при сличениях. Исследования позволяют сделать некоторые выводы о стабильности массы эталонов из платиноиридиевого сплава и оценить достижимую в настоящее время точность измерений массы.

В настоящей статье кратко излагаются результаты работ, выполненных в Международном бюро мер и весов [7].

#### Способы хранения и применения международного прототипа килограмма и состав эталон-свидетелей

Способу хранения и применения международного килограмма придается особое значение, так как от этого зависит его стабильность.

Международный прототип килограмма и его свидетели хранятся в подвале для прототипов; международный килограмм находится на подставке под двумя стеклянными колпаками, которые в свою очередь закрыты третьим колпаком с краном, покоящимся на стеклянной притертой пластине. Под колпаками можно создавать частичное разряжение. В 1889 г. международный прототип килограмма был помещен под колпак, под которым было создано разряжение. В настоящее время международный прототип хранится при атмосферном давлении, так как имеется предположение, что хранение в вакууме может вызвать увеличение нестабильности его массы. Килограммы-свидетели международного прототипа килограмма установлены на подставках под двумя колпаками, находящимися на металлической пластине, и хранятся при атмосферном давлении.

В период второй мировой войны международный прототип килограмма находился в подвале хранилища эталонов, а эталоны-свидетели были вывезены. На это время (1942—1945 гг.) международный прототип был помещен в латунный футляр, подвешенный на растяжках в центре стального ящика массой 80 кг.

С целью повышения сохранности международного прототипа килограмма была изменена методика передачи единицы национальным килограммам. При первой аттестации национальных килограммов в 1889 г. каждый из национальных килограммов сличался с международным прототипом килограмма. При следующих поверках национальных килограммов методика передачи единицы была изменена. Так, в 1913 г. национальные килограммы сличались с рабочими эталонами Международного бюро № 9 и 31, а в 1954 г. — с эталонами-свидетелями международного прототипа килограмма № 32 и 43, которые в 1946 г. сличались с международным килограммом.

С этой же целью в соответствии с решениями Международного бюро группа эталон-свидетелей была увеличена до шести (К1, № 7, № 8 (41), № 32, № 43, № 47). Килограммы К1, № 7, № 8 (41), № 32 выполнены из той же плавки металла, что и международный прототип килограмма. Килограммы № 43 и 47 были изготовлены из платиноиридиевого сплава в 1938 г. французской фирмой Леон—Альмана, а подгонка и полировка осуществлялась Лонгом.

В дальнейшем предполагается, что в периодической поверке, проводимой один раз в тридцать лет, будут применяться два свидетеля. Так как потери материала незначительны, то можно применять свидетели дважды, не сличая их с международным килограммом. Таким образом, сличения свидетелей будут производиться один раз в два столетия. Так как сличения свидетелей требуют меньшего числа измерений, чем периодические поверки национальных килограммов, то можно гарантировать, что износ международного килограмма будет незначительным. Это позволяет гарантировать величину единицы массы с точностью  $1 \cdot 10^{-8}$  в течение длительного времени.

Вероятно, в дальнейшем совместные работы физиков и метрологов позволят перейти на естественный эталон единицы массы.



## Методы очистки поверхности эталонов

Этому вопросу в Международном бюро уделяется особенное внимание. Еще в 1884 г. Марек, а в 1898 г. Тизен отмечали, что промывка и очистка поверхности эталонов массы не может не влиять на величину массы. Кроме того, он отмечал временную нестабильность массы некоторых эталонов, вводимых в сличения сразу после их промывки [1]. В 1946 г. было опубликовано специальное исследование Бонура об эффективности некоторых методов очистки гирь из платиноиридиевого сплава [3]. В 1964—1965 гг. в Международном бюро вновь исследовалось влияние очистки и промывки эталонов на стабильность их массы [4].

При первичной аттестации в 1889 г. все эталоны промывались парами воды и спирта. В 1913 г. при первой периодической проверке национальных килограммов поверхность эталонов очищалась только протиранием замшей, смоченной спиртом.

Исследования показали недостаточную эффективность последнего метода очистки эталонов и позволили рекомендовать перед проведением важнейших сличений промывать поверхность платиноиридиевых гирь парами дважды дистиллированной воды. Обычно промывке должна предшествовать очистка замшей, пропитанной спиртом или чистым бензином, так как пыль плотно пристает к металлу и не может быть удалена только промывкой. Перед каждым взвешиванием рекомендуется проводить мягкой кисточкой по всей поверхности эталона. Таким образом были обработаны эталоны во время сличений эталонов-свидетелей с международным прототипом килограмма в 1946 г. и при второй периодической проверке национальных килограммов.

Следует также обратить внимание на замечание Тизена, высказанное в 1893 г. и подтвержденное в наши дни Бонуром, о том, что влияние очистки и промывки, осуществленных в одинаковых условиях, оказывается неодинаковым для разных платиноиридиевых гирь. Таким образом, несмотря на многочисленные исследования, проблема влияния очистки эталонов еще не решена окончательно.

## Вес Международного бюро

Объектом постоянного внимания Международного бюро являются веса Рупрехта № 1 и веса Бунге, на которых производится сличение килограммов.

Во время первичной аттестации национальных эталонов были выявлены некоторые недостатки конструкции весов Рупрехта, после чего они были отправлены в Вену на переделку и юстировку. Основные изменения, произведенные Рупрехтом, относились к способу подвески чашек; теперь чашка подвешивается с помощью двух взаимно перпендикулярных призм. Был изменен также механизм пуска таким образом, что сначала происходит контакт у грузоприемных призм и подушек, а затем — у опорной призмы и подушки. Кроме того были добавлены механизмы, осуществляющие посадку маленьких грузиков на правую и левую серьги (разность масс этих грузиков дает возможность определить чувствительность весов), устройств с воздушным поршнем, позволяющее наблюдателю регулировать амплитуду колебаний коромысла.

Весы Бунге, после того как они побывали на всемирной выставке в 1900 г., также нуждались в юстировке. В связи с этим конструктором были заменены стальные призмы агатовыми и несколько модифицирован механизм пуска. По возвращении весов в Международное бюро Вена произвел их проверку и установил, что качество обоих весов одинаково [4].

В период между первой и второй периодическими поверками на весах Рупрехта производились все точные измерения массы от 50 г до 1 кг.

С целью выбора весов для сличения национальных прототипов в 1946 г. производилось их исследование. Установлено, что цена деления у весов Рупрехта равна 0,084 мг, а у весов Бунге — 0,036 мг. Средняя квадратическая погрешность ряда взвешиваний при сличениях гирь одинакового объема для весов Рупрехта равна 0,023 мг, а для весов Бунге — 0,021 мг. Таким образом, эти веса оказались равноценными по точности.

Заметим, что весы Рупрехта снабжены дистанционным управлением для накладывания грузика при определении цены деления; у весов Бунге для этого приходится открывать витрину. Вначале предпочтение было отдано весам Бунге, так как управление ими более легкое. В действительности, вторая периодическая поверка осуществлялась на обоих весах, пока два несчастных случая с килограммами № 9 и № 31 не заставили отказаться от весов Бунге.

В табл. 1 приведены значения массы свидетелей международного килограмма, из которых видна хорошая согласованность результатов, полученных на весах Рупрехта № 1 и Бунге (май—сентябрь 1946 г.).

Таблица 1

| Свидетель | Масса при взвешивании на весах Бунге | Масса при взвешивании на весах Рупрехта |
|-----------|--------------------------------------|---|
| K1        | 1 кг + 0,0962 мг                     | 1 кг + 0,1009 мг                        |
| № 7       | 1 кг - 0,4990 мг                     | 1 кг - 0,4993 мг                        |
| № 8 (41)  | 1 кг - 0,2992 мг                     | 1 кг + 0,3012 мг                        |
| № 32      | 1 кг + 0,1114 мг                     | 1 кг + 0,1034 мг                        |

В настоящее время назрела необходимость в новой поверке весов Рупрехта. Со времени их последней юстировки в 1937 г. было произведено более 700 полных взвешиваний, что представляет 175 000 колебаний. Несмотря на это, механизм арретирования работает безотказно и призмы не повреждены, однако некоторая юстировка все же необходима.

За последние 20 лет в некоторых национальных лабораториях появились весы, снабженные устройством, позволяющим осуществлять перенос гирь без нарушения контакта призмы с подушкой. Преимущества таких весов отмечались еще Пойтингом, затем Тизеном и Бенуа. А Скар указывал, что улучшение качества работы весов и повышение точности измерения достигается в этом случае не только благодаря тому, что не изменяется ориентация различных подвижных частей весов, но и не нарушается молекулярная связь между наружными поверхностями призмы и подушки.

В Национальном Бюро Стандартов в Вашингтоне в течение нескольких лет для сличений прототипа применяются одноплечие весы, которые дают хорошие результаты. Для того чтобы к очередной периодической поверке располагать наилучшими средствами измерений массы, необходимо использовать все усовершенствования, произведенные за последние годы в области точного весостроения.

#### Методика измерений

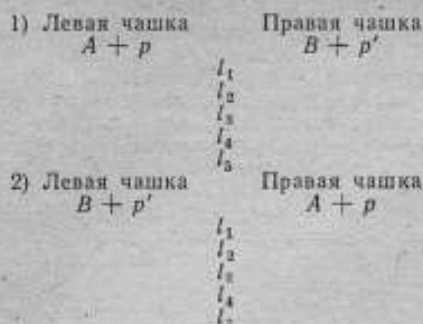
В Международном Бюро для определения положения равновесия весов производят пять отсчетов последовательных элонгаций. Отсюда вычисляют положение равновесия:

$$L_1 = \frac{1}{4} (l_1 + 2l_2 + l_3);$$

$$L_2 = \frac{1}{4} (l_2 + 2l_3 + l_4);$$

$$L_3 = \frac{1}{4} (l_3 + 2l_4 + l_5),$$

среднее из которых дает искомое положение равновесия. Хотя величины  $L_i$  очень близки друг к другу, чаще всего используют пять, а не три отсчета. Взвешивания производят по методу Гаусса.



Затем определяют чувствительность весов и эта пара измерений повторяется. Гиря переносится с одной чашки весов на другую 10 раз. После этого гири меняются местами на вспомогательных подставках  $p$  и  $p'$  и снова производятся измерения, аналогичные первой части. Все необходимое для сличения готовится накануне и первая половина измерений делается утром. После смены гири на площадках наблюдения производят не ранее, чем во второй половине дня.

В качестве вспомогательных площадок вначале использовались кварцевые диски диаметром 49 мм с отполированной поверхностью. Но так как гири прилипали к таким площадкам, то их заменили слегка вогнутыми площадками с отверстием в центре, диаметр которого равен 10 мм. Масса площадок подогнана с точностью 0,01—0,02 мг.

Для определения чувствительности на обе серьги весов помещают кусочки платиновой проволоки, разность масс которых позволяет создавать дополнительную нагрузку 0,25 или 0,50 мг; обычно пользуются нагрузкой 0,50 мг.

Весы располагаются от наблюдателя на расстоянии 4 м. Для того чтобы исключить влияние изменения температуры, они закрываются со всех сторон плотной шерстяной белой тканью, а у задней и передней стенок витрины ставятся щиты из прессованной пробки.

В начале и в конце каждой части взвешивания отсчитывают по ртутному термометру температуру внутри витрины весов, на уровне расположения сличаемых килограммов. Тщательно исследованный термометр Бодена № 16113 позволяет измерять температуру с точностью 0,01—0,02° С. Отсчет производится с помощью трубы, находящейся на расстоянии 40 см от прибора. Атмосферное давление измеряется после каждого отсчета температуры барометром Фузсса с погрешностью 0,03—0,04 мм рт. ст. Нижний мениск столба ртути находится на высоте чашек весов. Влажность воздуха определяется волосным гигрометром, установленным в витрине весов. Сличения, выполненные позднее с аспирационным психрометром, позволили установить, что влажность была известна с погрешностью 3—4%. Так как разность объемов сличаемых килограммов мала, то эта погрешность не повлияла на точность окончательного результата.

Что касается порядка сличений, то, как уже отмечалось, при аттестации 1888 г. прототипы сличались в группах между собой и каждый с международным килограммом. При периодических поверках они разбивались на группы, в которые включалось не менее двух свидетелей, сличенных ранее с международным килограммом. В группе производились попарные сличения в различных комбинациях. Результаты обрабатывались по способу наименьших квадратов.

**Результаты периодических поверок свидетелей международного прототипа килограмма и национальных килограммов**

В 1937 г. Международный комитет мер и весов принял решение о проведении Международным бюро генеральных сличений международного килограмма и его свидетелей. Сличения свидетелей К1, № 7, № 8 (41), № 32,

№ 43, № 47 с международным килограммом были осуществлены в 1939 г.

Перед взвешиванием все килограммы очищались замшей, пропитанной спиртом или дважды дистиллированным бензином; взвешивания осуществлялись на весах Рупрехта № 1. В табл. 2 приведены полученные в 1939 г. значения массы эталонов-свидетелей. Там же для сопоставления приведены их значения в 1889 г. и изменение их массы за период 1889—1939 гг.

Таблица 2

| Эталон  | Значение массы<br>в 1889 г. | Значение массы<br>в 1939 г. | Разность значений<br>массы, мг<br>(1939—1889 гг.) |
|---------|-----------------------------|-----------------------------|---|
| Ж       | 1 кг                        | 1 кг                        | —   |
| K1      | 1 кг + 0,127 мг             | 1 кг + 0,158 мг             | +0,031  |
| № 7     | 1 кг - 0,530 мг             | 1 кг - 0,481 мг             | +0,049  |
| № 8(41) | 1 кг + 0,260 мг             | 1 кг + 0,341 мг             | +0,081  |
| № 32    | 1 кг + 0,071 мг             | 1 кг + 0,133 мг             | +0,062  |
| № 43    | —                           | 1 кг + 0,260 мг             | —   |
| № 47    | —                           | 1 кг + 0,358 мг             | —   |

Оказалось, что масса всех эталонов-свидетелей увеличилась на значительную величину — от 0,031 до 0,081 мг. Была высказана гипотеза, объясняющая это положение [5]. Международный прототип килограмма хранится под тремя стеклянными колпаками; верхний колпак притерт к пластине, на которой он стоит. Остальные килограммы хранятся по одному, под двумя стеклянными колпаками, не притертыми к основанию. Можно предположить, что изменение воздуха вблизи международного килограмма превосходит медленнее, чем вблизи эталонов-свидетелей. Поэтому осадок твердых частиц, всегда присутствующих в воздухе, менее значителен на международном килограмме, чем на эталонах-свидетелях. Этот осадок исчезает только после промывки эталонов в парах воды или спирта. Значительное приращение массы эталонов-свидетелей по сравнению с их значениями в 1889 г. объясняется тем, что в 1939 г. эталоны не промывали парами воды.

В 1946 г. перед второй периодической поверкой национальных килограммов были осуществлены новые сличения эталонов-свидетелей с международным килограммом, которые частично подтвердили эту гипотезу. Перед сличениями килограммы были очищены бензином и чистым спиртом, затем промыты в струе пара дважды дистиллированной воды. Взвешивания производились на весах Бунге и Рупрехта № 1. В табл. 3 приведены значения массы

Таблица 3

| Эталон  | Значение массы<br>в 1889 г. | Значение массы<br>в 1946 г. | Разность значений<br>массы, мг<br>(1946—1889 гг.) |
|---------|-----------------------------|-----------------------------|---|
| Ж       | 1 кг                        | 1 кг                        | —   |
| K1      | 1 кг + 0,127 мг             | 1 кг + 0,098 мг             | -0,029  |
| № 7     | 1 кг - 0,530 мг             | 1 кг - 0,499 мг             | +0,031  |
| № 8(41) | 1 кг + 0,260 мг             | 1 кг + 0,300 мг             | +0,040  |
| № 32    | 1 кг + 0,071 мг             | 1 кг + 0,107 мг             | +0,036  |
| № 43    | —                           | 1 кг + 0,306 мг             | —   |
| № 47    | —                           | 1 кг + 0,405 мг             | —   |

эталон-свидетелей, полученные при сличениях в 1946 г. Там же даны значения массы этих эталонов, полученные в 1889 г., и изменение массы с 1889 по 1946 гг.

Хотя разность значений, полученных в 1946 и 1889 гг., меньше разности значений 1939 и 1889 гг., однако она превышает вероятную погрешность, которую можно было ожидать в этих сличениях.

Увеличение массы некоторых прототипов кажется невероятным. Направляется мысль, что  $\mathcal{K}$  и  $K1$  уменьшаются. Применительно к  $K1$  это предположение становится более ясным после рассмотрения табл. 4, в которой приведены разности массы между килограммами, полученные в 1889 г. и в 1946 г., а также разности этих разностей. Как видно, разности массы килограммов № 7, № 8 (41), № 32 практически получились одинаковыми.

Таблица 4

| Эталон-свидетель | Разность масс, мг |           | Разность разностей, мг (1946—1889 гг.) |
|------------------|-------------------|-----------|--|
|                  | в 1889 г.         | в 1946 г. |  |
| $K1$ —№ 7        | +0,657            | +0,597    | —0,060                                 |
| $K1$ —№ 8(41)    | —0,133            | —0,202    | —0,069                                 |
| $K1$ —№ 32       | +0,057            | —0,009    | —0,066                                 |
| № 7—№ 8(41)      | —0,790            | —0,799    | —0,009                                 |
| № 7—№ 32         | —0,600            | —0,606    | —0,006                                 |
| № 8(41)—№ 32     | +0,190            | +0,193    | +0,003                                 |

По сличениям 1946 г. разности массы между килограммами № 7, № 8 (41), № 32 и  $K1$  изменились по сравнению с данными сличений 1889 г. для всех килограммов практически на одну и ту же величину — от 0,060 до 0,068 мг. Если предположить, что килограммы № 7, № 8 (41) и № 32 не изменились, то  $K1$  уменьшился примерно на 0,06 мг. Так как из сличений килограмма  $K1$  с  $\mathcal{K}$  следует, что килограмм  $K1$  в 1946 г. по сравнению с 1889 г. уменьшился на 0,029 мг, то можно считать, что  $\mathcal{K}$  уменьшился примерно на 0,03 мг.

На основании результатов двух периодических поверок национальных килограммов приходим к заключению о возможности изменения килограмма  $\mathcal{K}$  примерно на 0,01 мг. Можно предположить, что если это уменьшение массы реально, то причиной его может быть то обстоятельство, что международный килограмм был помещен в 1889 г. в хранилище эталонов под колпак, под которым было создано некоторое разрежение воздуха. С другой стороны, правильнее считать, что очевидно разности остаются в границах погрешностей, которые содержались в измерениях, произведенных с шестидесятилетним интервалом и в различных условиях [6].

Первая периодическая поверка национальных эталонов производилась в 1913 г. Однако из-за несовершенства метода очистки поверхности эталонов результаты ее подверглись впоследствии сомнению, и поэтому они не приводятся в настоящей статье. Вторая периодическая поверка национальных килограммов проходила с 1948 по 1953 гг. Перед сличениями поверхность гирь протиралась замшей, смоченной спиртом или дважды дистиллированным бензином, и промывалась парами дважды дистиллированной воды. Килограммы были разбиты на группы по 10 гирь; в каждую группу включались по 2 свидетеля — № 32 и 43. Килограммы сличались попарно во всех возможных комбинациях. Для каждой группы производилось 45 сличений, результаты которых обрабатывались по способу наименьших квадратов. Результаты сличений приведены в табл. 5. Как показали результаты сличений национальных прототипов килограмма, из 24 килограммов, прошедших аттестацию в 1889 г. и в 1954 г., у тринадцати за период с 1889 по 1954 гг. изменение массы не превышает 0,02 мг, у восьми — от 0,022 до 0,039 мг. При этом масса некоторых килограммов в 1954 г. уменьшилась, а других — увеличи-



Таблица 5

| Номер эталона | Страна                              | Масса эталона   |                 | Разность масс, мг (1954—1889 гг.) |
|---------------|-------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------------------------|
|               |                                     | в 1889 г.       | в 1954 г.       |                                   |
| 2             | СРР                                 | 1 кг — 0,953 мг | 1 кг — 0,992 мг | —0,039                            |
| 3             | Испания                             | 1 кг + 0,021 мг | 1 кг + 0,044 мг | +0,023                            |
| 5             | Италия                              | 1 кг + 0,018 мг | 1 кг + 0,018 мг | 0,000                             |
| 6             | Япония                              | 1 кг + 0,169 мг | 1 кг + 0,170 мг | +0,001                            |
| 9             | Международное бюро мер и весов      | 1 кг + 0,282 мг | 1 кг + 0,306 мг | +0,024                            |
|               |                                     |                 | 1 кг + 0,278 мг | —0,004                            |
| 10            | Португалия                          | 1 кг + 0,228 мг | 1 кг + 0,263 мг | +0,035                            |
| 12            | СССР                                | 1 кг + 0,068 мг | 1 кг + 0,085 мг | +0,017                            |
| 15            | ГДР                                 | 1 кг + 0,226 мг | 1 кг + 0,239 мг | +0,013                            |
| 16            | ВНР                                 | 1 кг + 0,056 мг | 1 кг — 0,006 мг | —0,062                            |
| 18            | Англия                              | 1 кг + 0,070 мг | 1 кг + 0,071 мг | +0,001                            |
| 19            | Италия                              | 1 кг — 0,276 мг | 1 кг — 0,257 мг | +0,019                            |
| 20            | США                                 | 1 кг — 0,039 мг | 1 кг — 0,019 мг | +0,020                            |
| 21            | Мексика                             | 1 кг + 0,063 мг | 1 кг + 0,063 мг | 0,000                             |
| 23            | Финляндия                           | 1 кг + 0,061 мг | 1 кг + 0,098 мг | +0,037                            |
| 24            | Испания                             | 1 кг — 0,191 мг | 1 кг — 0,173 мг | +0,018                            |
| 25            | Франция (Парижская обсерватория)    | 1 кг + 0,107 мг | 1 кг + 0,138 мг | +0,031                            |
| 28            | Бельгия                             | 1 кг + 0,210 мг | 1 кг + 0,188 мг | —0,022                            |
| 31            | Международное бюро мер и весов      | 1 кг + 0,162 мг | 1 кг + 0,128 мг | —0,034                            |
|               |                                     |                 | 1 кг + 0,087 мг | —0,075                            |
| 34            | Франция (Французская Академия наук) | 1 кг — 0,073 мг | 1 кг — 0,078 мг | —0,005                            |
| 35            | Франция                             | 1 кг + 0,191 мг | 1 кг + 0,183 мг | —0,008                            |
| 36            | Норвегия                            | 1 кг + 0,157 мг | 1 кг + 0,186 мг | +0,029                            |
| 37            | Бельгия                             | 1 кг + 0,244 мг | 1 кг + 0,251 мг | +0,007                            |
| 38            | Швейцария                           | 1 кг + 0,183 мг | 1 кг + 0,214 мг | +0,031                            |
| 40            | Швеция                              | 1 кг — 0,037 мг | 1 кг — 0,039 мг | —0,002                            |
| 41            | ЧССР                                | —               | 1 кг + 0,559 мг | —                                 |
| 44            | Австралия                           | —               | 1 кг + 0,270 мг | —                                 |
| 46            | Индонезия                           | —               | 1 кг + 0,294 мг | —                                 |
| 48            | Дания                               | —               | 1 кг + 0,081 мг | —                                 |
| 49            | Австрия                             | —               | 1 кг — 0,325 мг | —                                 |
| 50            | Канада                              | —               | 1 кг — 0,130 мг | —                                 |
| 51            | ПНР                                 | —               | 1 кг + 0,185 мг | —                                 |
| 52            | ФРГ                                 | —               | 1 кг + 0,162 мг | —                                 |
| 53            | Голландия                           | —               | 1 кг + 0,085 мг | —                                 |
| 54            | Гурина                              | —               | 1 кг + 0,160 мг | —                                 |
| 55            | ФРГ                                 | —               | 1 кг + 0,208 мг | —                                 |

лась по сравнению с полученной в 1889 г. Два килограмма — № 10 и 31 — имеют явные следы износа.

Объяснить эти изменения массы очень трудно. Несомненно, большое значение имеет метод очистки поверхности эталонов перед сличениями, а также состояние поверхности. Так, поры и трещины, имеющиеся на поверхности почти всех прототипов, заполняются микроскопической пылью, что приводит к увеличению массы; тогда как трение нижней поверхности о подставку при

5 эксплуатации прототипов является причиной износа. Возможно, что с течением времени будет доминировать то одна, то другая причина.

До настоящего времени для подлирования гирь применялась наждачная бумага, которая оставляет на поверхности тонкие концентрические круги, хорошо видимые простым глазом. Эти круги могут быть причиной временных изменений массы прототипов.

Значение массы первичного эталона единицы массы СССР — килограмма № 12 увеличилась по сравнению со значением 1889 г. на 0,017 мг. Килограмм № 26, являющийся свидетелем первичного эталона единицы массы СССР, сличался в Международном бюро в 1957 г., получено новое значение массы 1 кг — 0,0157 мг, которое больше на 0,016 мг значения 1889 г.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Marek W. J. *Pesées. Travaux et Mémoires*. B. J. P. M., p. D. 129 1884.
2. Thiesen M. *Kilogrammes prototypes. 3-e partie, Travaux et Mémoires*, B. J. P. M., 9, 1898, p. 34.
3. Bonhoure A. *Note sur l'efficacité de quelques procédés de nettoyage des poids en platine iridie. Procès-Verbaux*. C. J. P. M., 20, 1946, p. 171.
4. *Procès-Verbaux*. C. J. P. M., 33, 1965, p. 37.
5. *Procès-Verbaux*. C. J. P. M., 3, 1905, p. 112.
6. *Procès-Verbaux*. C. J. P. M., 1888, p. 94.
7. Bonhoure A. *Kilogrammes prototypes. Travaux et Mémoires*, B. J. P. M., 22, 1966.

Поступила в редакцию 20/XII 1970 г.

УДК 681.261.2

А. Н. НЕЧАЕВ  
ВНИИМ

## НОВЫЕ ЛАБОРАТОРНЫЕ ВЕСЫ И ВЕСОВЫЕ УСТАНОВКИ

Завод «Госметр» разрабатывает и выпускает лабораторные весы и установки, основанные на весовом принципе, специального назначения, например для разбраковки изделий по массе, измерения крутящих моментов, плотности твердых и жидких тел и т. п. В разработках используются современные конструктивные решения отдельных узлов весов: равноплечие и двухпризменные коромысла, квадранты, металлические и кварцевые коромысла на призмах и металлических и кварцевых растяжках, автоматическая и ручная компенсация измеряемой массы, автоматический подбор гирь, устройства для предварительного взвешивания и устройства для компенсации массы тары, дистанционное управление весами, дистанционный показ результата взвешивания и т. д.

Ниже приводятся описания новых лабораторных весов и установок, выпускаемых заводом.

Образцовые весы первого разряда и первого разряда повышенной точности были разработаны по заданию Госкомитета стандартов, мер и измерительных приборов. Они предназначены для поверки образцовых гирь пер-

вого и второго разряда и гири 1- и 2-го класса и представляют собой равноплечие весы без демферов. Весы с пределом взвешивания 5 и 20 кг снабжены механизмом выноса чашек. Характеристики образцовых весов приведены на стр. 23.

Разработаны и выпускаются серийно ультрамикрoаналитические весы на 5, 20 и 100 мг с ценой деления соответственно 0,05, 0,3 и 0,5 мкг и вариацией в пределах 1—2 делений.

Ведутся работы по созданию весов на 500 мг с ценой деления 0,05 мкг и весов на 1 мг с ценой деления (0,001—0,002) мкг. Равноплечее коромысло этих весов выполнено из кварцевых стержней и подвешено на кварцевых горизонтальных нитях, заканчивающихся кварцевыми амортизирующими пружинами. Весы работают по нулевому методу. Для компенсации момента, создаваемого измеряемой массой, закручивается кварцевая несущая нить. На экран отсчетного устройства проектируются деления лимба, установленного соосно с закручиваемой нитью. В качестве нуля-индикатора использована оптическая система с зеркалом, укрепленным на коромысле.

Для уменьшения влияния изменений температуры воздуха в помещении коромысло помещено в контейнер. Весы снабжены манипулятором, обеспечивающим плавное снятие чашки и вынос ее за пределы витрины, благодаря чему уменьшается вероятность обрыва подвески при наложении нагрузки на чашку. Весы работают надежно даже в условиях вибрации.

Выпускаются специальные весы наибольшей допускаемой нагрузкой от 20 г до 10 мг с дистанционным управлением для работы в агрессивной среде, где присутствие человека недопустимо. В основу весов положены квадранты, двухпризменные и равноплечие трехпризменные коромысла специального исполнения.

Все механизмы весов, такие как изолир, механизм гиреналожения, регулировки нуля, открывания двери и другие имеют специальные приводы, которые включает оператор с пульта управления. Дистанционный отсчет показаний весов производится при помощи индуктивного датчика, аналоговых или дискретных фотодатчиков.

Витрина и все наружные детали весов изготовлены из нержавеющей стали, так как при эксплуатации требуется периодическая промывка этих узлов растворами кислот или щелочей. В зависимости от условий работы на весах в камере конструкция подвески, расположение двери, экрана и некоторых других устройств могут быть выполнены по-разному.

В табл. 1 даны характеристики специальных весов с дистанционным управлением, которые нашли наиболее широкое применение. Такие весы, снабженные сосудом для жидкости и специальной подвеской, могут быть использованы также для дистанционного определения плотности твердых тел методом гидростатического взвешивания с погрешностью не более 0,5%.

Таблица 1

| Модель весов      | Наибольшая измеряемая масса | Цена деления устройства дистанционного отсчета | Погрешность весов при дистанционном взвешивании |
|-------------------|-----------------------------|--|---|
| BC-20-0,1/0,01-ДУ | 20 г                        | 0,1 мкг  | ±0,3 мкг  |
| BC-100-1/0,1-ДУ   | 100 г                       | 1 мкг  | ±2 мкг  |
| BC-200-1/0,1-ДУ   | 200 г                       | 1 мкг  | ±2 мкг  |
| BC-2-1-ДУ         | 2 кг                        | 1 мкг  | ±5 мкг  |
| BC-5-1000-ДУ      | 5 кг                        | 1 г  | ±1 г  |
| BC-10-1000-ДУ     | 10 кг                       | 1 г  | ±1 г  |

В автоматах для измерения плотности (модель АИП) имеется устройство для предварительного взвешивания; автоматизированы процессы подбора гирь, загрузки образцов в автомат, перенос образцов с одних весов на другие, вычисление плотности по результатам измерения и печатание результата на бумажной ленте. Для измерения плотности автомат взвешивает образец в воздухе, в жидкости с известной плотностью  $\rho$  и вычисляет плотность образца

$$\gamma = \frac{(\rho - \epsilon) P_1}{P_1 - P_2},$$

где  $\epsilon$  — плотность воздуха;  $P_1$  и  $P_2$  — масса гирь, уравновешивающих образец в воздухе и в жидкости.

В автомате предусмотрено двое весов с устройством для предварительного взвешивания: одни — для взвешивания образца в воздухе, вторые — для взвешивания образца в жидкости. Это позволяет повысить точность, так как подвеска первых весов никогда не смачивается жидкостью, а подвеска вторых — всегда опущена в сосуд с жидкостью. Задающее устройство автомата приводит в действие по заданной программе все механизмы весов, а также осуществляет подачу образцов на чашку первых весов и перенос их на чашку вторых весов.

Электронная схема автомата состоит из двух фотоэлектрических кодовых преобразователей, преобразующих угол отклонения каждого из коромысел весов в цифровой код, запоминающих устройств, устройства вычитания, множительно-делительного и цифроречевого устройств.

Для определения плотности образцов правильной цилиндрической формы, которые нельзя смачивать водой, изготавливаются другие весовые автоматы (модель АРП), разбраковывающие образцы по плотности. Автомат включает весы для определения массы образца  $P$ , измеритель высоты  $H$  образца, грузочное и задающее устройства. Плотность вычисляется по формуле  $\gamma = \frac{P}{HS}$ ,

где  $S$  — площадь поперечного сечения образца.

Установка настраивается на заданную плотность, диаметр, высоту и массу образца; при работе автоматически измеряются отклонения от номиналов по высоте и массе с выдачей соответствующих сигналов фотоэлектрическим датчиком в счетно-решающее устройство.

Большой интерес представляют термомассомеретрические весовые установки (модель ТМВ), предназначенные для регистрации изменения массы в функции времени и температуры в ходе физико-химических реакций в условиях регулируемой газовой среды, вакуума, избыточного давления при высоких и низких температурах. Они состоят из равноплечих весов с автоматическим уравновешиванием коромысла, электрической печи и пульта управления.

Регистрация массы исследуемого вещества и запись температуры в электропечи производятся потенциометрами ЭПП-09, которые установлены на пульте управления. Наибольшая масса исследуемого образца 30 или 50 г.

В вакуумных термомассомеретрических установках (модель УВДТ) используются электронные микровесы на нагрузку 1 г с ценой деления 1 мкг. Для разбраковки по весовым группам мелких изделий, например естественных и искусственных алмазов, ферритовых колец и др. выпускается ряд установок. Для разбраковки изделий массой до 500 г и 2000 г на базе квадратных весов изготовлены автоматы (модель АРВ), сортирующие изделия на три группы: годные, брак исправимый и брак не исправимый. Кинематическая схема автомата приведена на рис. 1. В квадратные весы введены две скобы 1 и 2 с установленными на них фотоэлектрическими системами 3 и 4. Ось вращения скоб совпадает с осью вращения квадранта. На квадрante установлена пластина 5 с двумя пазами для прохода световых лучей фотоэлектрических систем. При настройке автомата квадрат отклоняется на угол, соответствующий максимальному значению массы годного изделия.

Микроинтентом 6 скоба 1 устанавливается так, чтобы край соответствующего паза перекрывал световой луч фотоэлектрической системы 4, направленный на фотозлемент 8.

Аналогичным образом производится настройка фотоэлектрической системы 3 микроинтентом 7 на минимальное значение массы годного изделия. При наложении на чашку весов бракованного изделия срабатывает фотоэлектрическая система 3 или 4 и выдает сигнал о браке.

Изготовлены также автоматы для разбраковки по массе трубок, слитков металлов и другие.

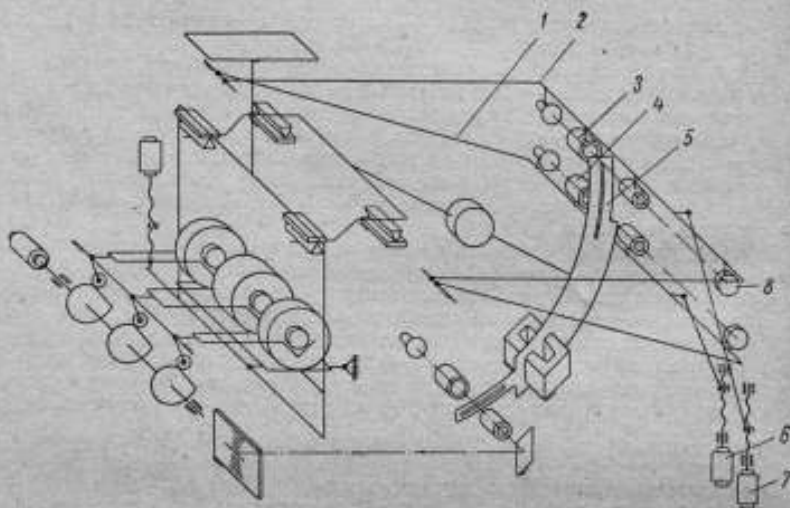


Рис. 1. Кинематическая схема автомата для разбраковки изделий (модель АРВ)

За последние годы для измерения статических крутящих моментов при отработке датчиков следящих систем, устройств с упругими элементами, опор малого трения используются моментомеры, основанные на весовом принципе.

Чувствительным элементом весового моментомера модели ПДМ (рис. 2) является равноплечее коромысло, на котором жестко устанавливается ротор — подвижная часть испытуемого датчика 9. Опорная призма коромысла помещается во вкладыш 2 соосно с посадочным местом 3 для ротора.

Свободно вращающийся вал 4, на котором устанавливается оправка со статором 5, выведен из витрины и укреплен на каретке 6, перемещающей статор в трех взаимно перпендикулярных направлениях на  $\pm 25$  мм с погрешностью не более 0,005 мм. На валу установлена также угломерная головка с ценой деления 1 минута.

Измеряемый крутящий момент, возникающий на роторе, компенсируется наложением на подвеску 7 или снятием с нее гирь, действующих на рабочее плечо коромысла. Для компенсации измеряемого момента, отклоняющего коромысло в пределах оптической шкалы, применяется электромагнитное устройство, действующее на подвеску 8. Оно состоит из двух постоянных магнитов, укрепленных на подвеске 8 и помещенных в магнитное поле соленоида, который втягивает или выталкивает подвеску в зависимости от направления постоянного тока в катушке соленоида. Сила, с которой магнит



ное поле соленоида действует на подвеску 8, пропорциональна току, протекающему в обмотке соленоида, и измеряется по шкале микроамперметра.

Измеряемый момент  $M = Pb + aU$ , где  $a$  — отсчет по шкале микроамперметра;  $U$  — цена деления шкалы микроамперметра, отградуированной в единицах момента;  $P$  — вес тирь, наложенных на подвеску 7,  $b$  — длина плеча коромысла.

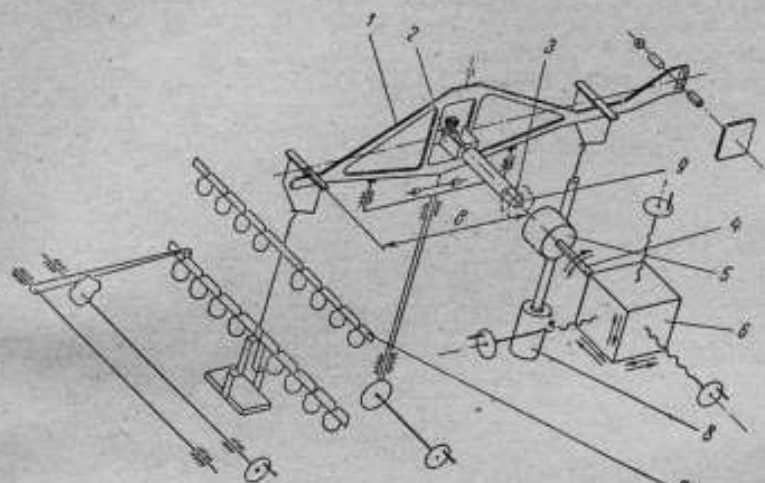


Рис. 2. Кинематическая схема моментомера (модель ПДМ)

Для измерения моментов выпускаются приборы (модели ПДМ-20 и ПДМ-70) со следующими техническими характеристиками:

|  | ПДМ-20 | ПДМ-70 |
|--|--------|--------|
| Наибольший измеряемый момент, <i>гс·см</i> . . . . .                           | ±50    | ±50    |
| Цена деления по шкале микроамперметра, <i>мгс·см</i> ; при измерении моментов: |        |        |
| 0 ± ±1 <i>гс·см</i> . . . . .  | 0,1    | 1,0    |
| ±1 ± ±50 <i>гс·см</i> . . . . .  | 1,0    | 1,0    |
| Наибольшая погрешность, <i>мгс·см</i> , при измерении моментов:                |        |        |
| 0 ± ±1 <i>гс·см</i> . . . . .  | 0,6    | —      |
| ±1 ± ±50 <i>гс·см</i> . . . . .  | 4,5    | 4,5    |
| Масса ротора с (оправкой), <i>г</i> . . . . .                                  | 20     | 70     |

Таблица 2

| Прибор            | Предел измерения, <i>мгс·см</i> | Цена деления, <i>мгс·см</i> | Погрешность измерения, % |
|-------------------|---------------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| ММО-70-10-0,02    | ±10                             | 0,02                        | 0,28                     |
| ММД-70-100-0,002: |                                 |                             |                          |
| I диапазон        | ±1                              | 0,002                       | 0,3                      |
| II     »          | ±10                             | 0,01                        | 0,3                      |
| III   »           | ±100                            | 0,1                         | 0,2                      |

В микромоментах для повышения чувствительности подвижная часть датчика подвешивается на вертикальной растяжке. Этот принцип использован в микромоментах моделей ММО-70-10-0,02 и ММД-70-100-0,002, технические характеристики которых даны в табл. 2.

В ближайшее время на заводе будет разработана базовая конструкция квадрантных весов на 500 г с ценой деления 10 мг и на их основе — квадрантные весы на 100 г и 2 кг с ценой деления 5 и 100 мг. Начнется серийный выпуск двухпризменных весов на нагрузки 200, 100 и 20 г с ценой деления соответственно 0,1; 0,05 и 0,01 мг.

Поступила в редакцию 30/XII 1970 г.

В.  
ки.

до

вы

ста

точ

по

чес

то

Ус

в д

ст

ма

и п

пр

## СОДЕРЖАНИЕ

|   |     |
|---|-----|
| Н. А. Смирнова, М. И. Тютикова, М. Н. Мошкова, В. С. Снегов. Сличения эталонов-копий с Государственным эталоном килограмма СССР в 1968—1969 гг. . . . . | 3   |
| Н. А. Смирнова, М. И. Тютикова. Наборы рабочих эталонных гирь массой от 1 до 10 кг . . . . .  | 16  |
| Н. А. Смирнова, М. И. Тютикова. Образцовые весы высокой точности . . . . .  | 20  |
| Н. А. Смирнова, С. И. Торопин. Исследование и аттестация группы исходных образцовых пурок 1-го разряда повышенной точности . . . . .                    | 25  |
| В. Г. Феоктистов. Влияние внутренних «гармонических» помех на рычажные весы . . . . .   | 35  |
| В. Г. Феоктистов. Динамические свойства весов с автоматическим уравновешиванием . . . . .   | 46  |
| В. Я. Кузьмин. Анализ погрешностей аналитических весов с фотоэлектрическими кодовыми преобразователями . . . . .  | 60  |
| Н. А. Смирнова, М. Н. Мошкова, А. Т. Руденко. Установка для определения магнитного момента гирь . . . . .   | 63  |
| Е. И. Перельман. Современные методы взвешивания вагонов в движении . . . . .  | 66  |
| Л. К. Каяк, С. И. Торопин, Ю. П. Ефремов. Усовершенствование метода определения ускорения силы тяжести с помощью маятников . . . . .                    | 71  |
| С. М. Агеев. О поверке вагонных весов . . . . .   | 78  |
| С. М. Агеев. Поверка большегрузных бункерных весов . . . . .  | 80  |
| М. И. Тютикова. Новые стандарты на лабораторные весы и гири . . . . .   | 82  |
| Н. А. Смирнова, М. Н. Мошкова. Сличения национальных прототипов-килограмма в Международном бюро мер и весов . . . . .                                   | 85  |
| А. Н. Нечаев. Новые лабораторные весы и весовые установки . . . . .   | 93  |
| Рефераты публикуемых статей . . . . .   | 100 |

## РЕФЕРАТЫ ПУБЛИКУЕМЫХ СТАТЕЙ

УДК 531.75.089.6

### СЛИЧЕНИЯ ЭТАЛОНОВ-КОПИЙ С ГОСУДАРСТВЕННЫМ ЭТАЛОНОМ КИЛОГРАММА СССР В 1968—1969 гг.

*Н. А. Смирнова, М. И. Тютикова, М. И. Мошкова, В. С. Снегов*

*Труды метрологических институтов СССР. Исследования в области измерений массы, вып. 132 (192), 1972 г., стр. 3—16.*

Излагается новый порядок и результаты сличений эталонов-копий с Государственным эталоном килограмма СССР. Приводятся формулы для вычисления поправок эталонов-копий и оценки точности этих поправок, а также вычисленные по этим формулам на основании произведенных сличений новые значения массы эталонов-копий.

На основании анализа стабильности массы эталонов-копий за десять лет их применения и требований, предъявляемых к ним, делается вывод о необходимости расширения группы эталонов-копий. Излагаются работы, проведенные в этом направлении.

Таблиц 4, библиографий 7.

УДК 681.26.074.089.6

### НАБОРЫ РАБОЧИХ ЭТАЛОННЫХ ГИРЬ МАССОЙ ОТ 1 ДО 10 кг

*Н. А. Смирнова, М. И. Тютикова*

*Труды метрологических институтов СССР. Исследования в области измерений массы, вып. 132 (192), 1971 г., стр. 16—19.*

Приведены результаты исследования аттестации наборов гирь массой от 1 до 10 кг, изготовленных из нержавеющей стали рижским заводом «Эталон». Показано, что по своим характеристикам они отвечают требованиям, предъявляемым к рабочим эталонам и могут быть утверждены в качестве рабочих эталонных наборов гирь.

Таблиц 2, библиографий 1.

УДК 681.261.2—187.4.089.6

### ОБРАЗЦОВЫЕ ВЕСЫ ВЫСОКОЙ ТОЧНОСТИ

*Н. А. Смирнова, М. И. Тютикова*

*Труды метрологических институтов СССР. Исследования в области измерений массы, вып. 132 (192), 1972 г., стр. 20.*

Излагаются вопросы, связанные с методикой расчета основных метрологических характеристик весов, и приводится краткое описание и характеристики образцовых весов 1-го разряда повышенной точности до 2 г, 200 г и 1 кг, образцовых весов 1-го разряда до 5 и 20 кг, выпущенных отечественной промышленностью.

Таблиц 1, иллюстраций 5, библиографий 5.

УДК [681.261.2 : 633.1].089.6

### ИССЛЕДОВАНИЕ И АТТЕСТАЦИЯ ГРУППЫ ИСХОДНЫХ ОБРАЗЦОВЫХ ПУРОК 1-го РАЗРЯДА ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТИ

*Н. А. Смирнова, С. Н. Торошин*

*Труды метрологических институтов СССР. Исследования в области измерений массы, вып. 132 (192), 1972 г., стр. 25—34.*

Излагаются результаты исследования и аттестации группы исходных литровых образцовых пурок 1-го разряда повышенной точности.

В соответствии с принятой методикой сличения пурок дана оценка накопленной погрешности при определении поправок к показаниям образцовых пурок 1-, 2-го разряда и рабочих пурок.

Таблиц 6, иллюстраций 2, библиографий 1.

УДК 681.261.2

### ВЛИЯНИЕ «ВНУТРЕННИХ» ГАРМОНИЧЕСКИХ ПОМЕХ НА РЫЧАЖНЫЕ ВЕСЫ

*В. Г. Феоктистов*

*Труды метрологических институтов СССР. Исследования в области измерений массы, вып. 132 (192), 1972 г., стр. 35-46.*

Рассматривается влияние раскачивания подвесок рычажных весов на поведение коромысла. Выведено дифференциальное уравнение движения колебательной системы при условии, что одна из подвесок совершает незатухающие периодические колебания, обусловленные начальным случайным толчком, а вторая подвеска неподвижна.

Показано, что раскачивание подвесок особенно неблагоприятно для быстродействующих весов с автоматическим уравниванием и является основным препятствием к повышению их чувствительности.

Даны рекомендации для уменьшения влияния раскачивания подвесок за счет правильной юстировки коромысла, синхронизации колебаний подвесок, введения усилителей колебаний подвесок или введения частотного фильтра на входе выходного прибора. Библиографий 4, иллюстраций 6.

УДК 681.261.2.082.13

### ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЕСОВ С АВТОМАТИЧЕСКИМ УРАВНОВЕШИВАНИЕМ

*В. Г. Феоктистов*

*Труды метрологических институтов СССР. Исследования в области измерений массы, вып. 132 (192), 1972 г., стр. 45-60.*

Рассмотрены динамические характеристики весов с автоматическим уравниванием в линейном приближении и с учетом влияния насыщения усилителя. Анализ динамических свойств произведен при помощи математической модели, которая является достаточно точным отражением реальной системы. Приведены уравнения для расчета параметров корректирующих звеньев, обеспечивающих минимальное значение показателя колебательности. Выведены уравнения переходного процесса системы при различных характерах входного возмущающего воздействия.

По уравнению переходного процесса рассчитаны и табулированы значения перерегулирования и времени переходного процесса для значений показателя колебательности замкнутой системы от 1,1 до 1,9 при единичном скачкообразном входном воздействии.

Нелинейность характеристики усилителя, обусловленная насыщением, приводит к резкому возрастанию значений перерегулирования и времени переходного процесса при больших начальных расогласованиях. Поэтому для каждой системы существует предельное быстродействие, повысить которое можно только за счет ухудшения точностных характеристик.

Таблиц 1, библиографий 6, иллюстраций 14.

УДК 681.261.2.088

### АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ АНАЛИТИЧЕСКИХ ВЕСОВ С ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ КОДОВЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ

*В. Я. Кузьмин*

*Труды метрологических институтов СССР. Исследования в области измерений массы, вып. 132 (192), 1972 г., стр. 60-62.*

Рассматриваются погрешности аналитических весов с фотоэлектрическими кодовыми преобразователями (ФКП). Особое внимание уделяется анализу погрешностей считывающего устройства ФКП.

Приводятся формулы для определения суммарной погрешности весов с ФКП.

Библиографий 2, иллюстраций 1.

УДК 681.26.074 : 538.215

### УСТАНОВКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНИТНОГО МОМЕНТА ГИРЬ

*Н. А. Смирнова, М. Н. Мошкова, А. Т. Руденко*

*Труды метрологических институтов СССР. Исследования в области измерений массы, вып. 132 (192), 1972 г., стр. 63-65.*

Описывается установка для определения магнитных моментов гирь. Приведены результаты испытаний магнитных характеристик гирь из различных марок сталей и рекомендованы марки сталей, пригодные для изготовления точных гирь.

Иллюстраций 1, таблиц 1.



УДК 681.264.3

### СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ВЗВЕШИВАНИЯ ВАГОНОВ В ДВИЖЕНИИ

*Е. Н. Перельман*

*Труды метрологических институтов СССР. Исследования в области измерений массы, вып. 132 (192), 1972 г., стр. 66—71.*

Рассматриваются современные отечественные и зарубежные методы и средства для взвешивания вагонов в движении. Дается методика поверки вагонных весов, предназначенных для взвешивания вагонов в составе на ходу без расцепки.

Таблиц 2, библиографий 13, иллюстраций 1.

УДК 531.53

### УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ УСКОРЕНИЯ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ С ПОМОЩЬЮ МАЯТНИКОВ

*Л. К. Каяк, С. И. Торопин, Ю. П. Ефремов*

*Труды метрологических институтов СССР. Исследования в области измерений массы, вып. 132 (192), 1972 г., стр. 71—75.*

Описывается усовершенствованный метод определения ускорения силы тяжести с помощью физических маятников, позволяющий исключить влияние многих систематических погрешностей.

Иллюстраций 4, библиографий 1.

УДК 681.264.3.089.6

### О ПОВЕРКЕ ВАГОННЫХ ВЕСОВ

*З. М. Агеев*

*Труды метрологических институтов СССР. Исследования в области измерений массы, вып. 132 (192), 1972 г., стр. 78—80.*

Приводится анализ причин, влияющих на точность взвешивания на вагонных весах. Рассмотрены недостатки метода поверки вагонных весов с помощью контрольно-весовой платформы массой 25 т и преимуществ метода поверки вагонных весов с помощью весоповерочного вагона массой 82 т и 120 т. Отмечается необходимость разработки поверочных средств для поверки образцовых гирь большой массы.

УДК 681.267.3.089.6

### ПОВЕРКА БОЛЬШЕГРУЗНЫХ БУНКЕРНЫХ ВЕСОВ

*С. М. Агеев*

*Труды метрологических институтов СССР. Исследования в области измерений массы, вып. 132 (192), 1972 г., стр. 80—82.*

Изложена новая методика поверки бункерных весов с предельной нагрузкой 70 т, с коромысловым отсчетным устройством, применяемая в весовой поверочной лаборатории ВНИИМ.

Отличительная особенность новой методики состоит в том, что в качестве поверочных средств использовано приспособление Кремера для поверки автомобильных весов со шкальным коромыслом, и граммовые и миллиграммовые наборы образцовых гирь 4-го разряда заменены на гири 3-го разряда. Показано, что при определении метрологических характеристик весов это приспособление позволит сократить число тарирований до одного.

УДК 681.261.2 (083.75)

### НОВЫЕ СТАНДАРТЫ НА ЛАБОРАТОРНЫЕ ВЕСЫ И ГИРИ

*М. Н. Тютикова*

*Труды метрологических институтов СССР. Исследования в области измерений массы, вып. 132 (192), 1972 г., стр. 82—85.*

Рассмотрены новые государственные стандарты на лабораторные весы и гири, разработанные в СССР за последние годы; указаны особенности построения этих стандартов и основные отличия их от применяемых ранее.

Приводятся некоторые сведения о работах, проводимых по линии СЭВ и МОЗМ в области стандартизации лабораторных весов и гирь.

УДК 531.75.089.68

**СЛИЧЕНИЯ НАЦИОНАЛЬНЫХ ПРОТОТИПОВ КИЛОГРАММА  
В МЕЖДУНАРОДНОМ БЮРО МЕР И ВЕСОВ**

*Н. А. Смирнова, М. Н. Мошкова*

*Труды метрологических институтов СССР. Исследования в области измерений массы, вып. 132 (192), 1972 г., стр. 85-93.*

Дано описание эталона массы и метрологических весов Международного бюро мер и весов, применяемых для сличения национальных прототипов килограмма. Освещаются вопросы хранения международного прототипа килограмма и его свидетелей, методы очистки поверхности эталонов массы и методы их сличения.

Статья представляет собой обзор опубликованных работ Международного бюро мер и весов, посвященных эталонам массы.

Таблиц 5, библиографий 7.

УДК 681.261.2

**НОВЫЕ ЛАБОРАТОРНЫЕ ВЕСЫ И ВЕСОВЫЕ УСТАНОВКИ**

*А. Н. Нечаев*

*Труды метрологических институтов СССР. Исследования в области измерений массы, вып. 132 (192), 1972 г., стр. 93-98.*

Приведены характеристики и описания новых лабораторных весов, разработанных заводом «Госметр».

Дано также описание некоторых установок, основанных на весовом принципе и применяемых для измерения крутящих моментов, разбраковки материалов и деталей по массе и т. п.

Таблиц 2.

**ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ИЗМЕРЕНИЙ МАССЫ**

**Труды метрологических институтов СССР**

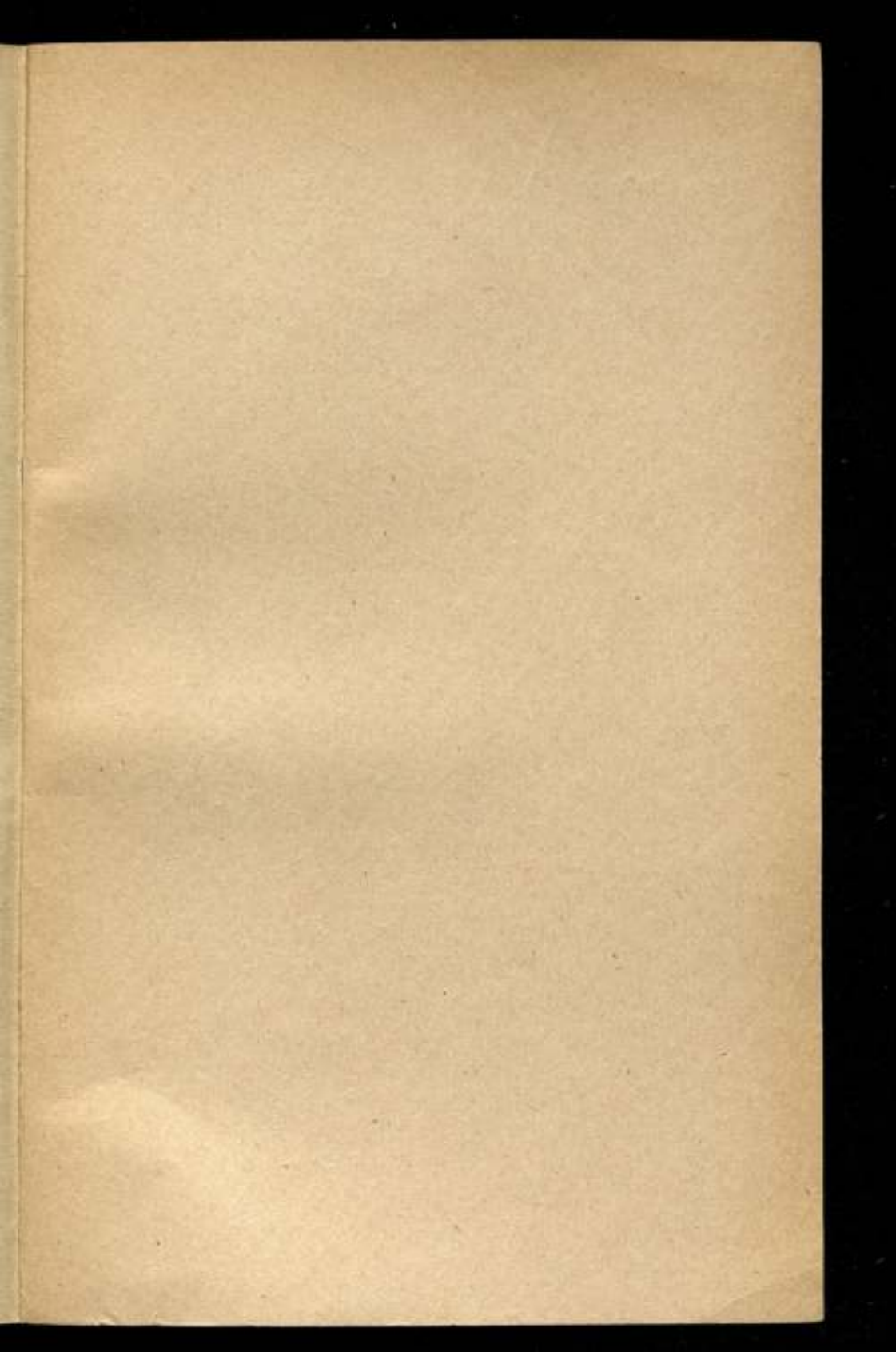
**Выпуск 132 (192)**

Редактор Н. Н. Александрова  
Технический редактор З. Г. Вагер

Сдано в производство 6.XII 1971 г. Подписано к печати 17.V 1972 г. М.06342.  
Печ. л. 6,5 Уч.-изд. л. 9,1. Бум. л. 3,25. Бумага типографская № 3. Формат  
60 × 90<sup>1/16</sup>. Тираж 2000 экз. Заказ 2502. Цена 91 коп.

Ленинградское отделение издательства «Энергия», Марсово поле, 1.

Ленинградская типография № 4 Главполиграфпрома Комитета по печати при Совете  
Министров СССР, Социалистическая, 14.



Цена 91 коп.